
DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

**PROPUESTA DE DISEÑO SÍSMICO PARA ESTRUCTURAS
DEL GRUPO “B” EN MEXICALI , BAJA CALIFORNIA.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

P R E S E N T A

Rubén Carrillo Arvayo

Director de Tesis:

Dr. Hugón Juárez García

AGRADECIMIENTOS

La presente tesis es el resultado de un esfuerzo en conjunto el cual directa o indirectamente participaron varias personas a lo largo de todo el proceso, a las cuales sin su valiosa aportación no hubiese sido posible la conclusión de este trabajo, así también hay personas que merecen las gracias por haber dejado una gran huella en mi camino.

Agradezco a Dios por llenarme de dichas y bendiciones, y siempre cuidar de mis pasos a lo largo de este camino llamado vida.

A mis padres Víctor Manuel y María Elena, mis hermanos Montserrat, Carolina y Víctor y mis tíos Rodolfo, Iris, Guadalupe y Daniel porque siempre conté con el apoyo incondicional, guía y confianza en la realización de mis sueños, además por todos los interminables consejos que me han servido para ser la persona que soy ahora.

A mi abuela Cruz por enseñarme que los números eran divertidos y me servirían en un futuro y aunque ya no se encuentre conmigo, seguirá siendo parte importante de mi vida.

A Anahí, por su inagotable paciencia, apoyo y compromiso. Gracias por enriquecer mi vida con amor y alegría y recordarme lo valioso de la vida y mucho más por compartirla conmigo.

A mis profesores que compartieron conmigo sus conocimientos. Especialmente al Dr. Hugón Juárez García por haber confiado en mí, y por su apoyo en la dirección de este trabajo. A los doctores María de la Consolación Gómez, José Luis Rangel y Dante Tolentino por su atenta lectura de este trabajo, sus comentarios y correcciones.

Por Último agradezco al consejo Nacional de Ciencia y tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado a lo largo de toda mi formación en la maestría.

Gracias a todos.

RESUMEN

En este trabajo se presenta una propuesta de diseño sísmico para estructuras del grupo B para Mexicali, Baja California. Para ello, se hizo un estudio de Peligro Sísmico; además, se definió una malla de puntos con EPU conocidos, y entonces se utilizó el Método de Ponderación de Distancia Inversa, Sheppard, 1968 para obtener nuevos parámetros sísmicos. Esta metodología podría ser utilizada y ampliada para encontrar EPU en todo el territorio mexicano.

En este trabajo se utilizaron 27 fuentes tipo falla y 4 fuentes tipo área que aportan al peligro sísmico de la región. Asimismo, se revisaron las reglamentaciones sísmicas estatales y locales de la región, para poder hacer comparaciones.

En el sismo de 4 de abril de 2010 había un edificio instrumentado en la ciudad de Mexicali. Con la información de los registros de aceleración y la distribución geométrica de sus elementos estructurales, se modeló esta estructura y se calibró con las aceleraciones registradas. Este edificio se comparó con distintos parámetros sísmicos, obtenidos en este trabajo, con la finalidad de observar cómo varían las demandas sísmicas de una estructura, si esta se localiza en diferentes zonas de Mexicali.

Finalmente, una vez que se calcularon los parámetros sísmicos de diseño, se obtuvieron 204 espectros de sitio – para suelo firme - en el municipio de Mexicali, los cuales se presentan en el Apéndice A y son representativos de un espectro de diseño elástico para estructuras del tipo B.

ABSTRACT

An earthquake design proposal for type B structures in Mexicali, Baja California is presented in this research. We conducted a seismic hazard; and we also included a grid with UHS values along the region, and with the Inverse Distance Weighted methodology by Sheppard, 1968, new seismic parameters were obtained. The whole procedure could be used in Mexico. We used 31 seismic sources (27 faults and 4 areas) for the region; we also reviewed the seismic provisions, so we could compare all the values.

During the April 4th, 2010 earthquake in Mexicali, there was an instrumented building that could record the time histories, and along with the structural and geometrical information a mathematical model was assessed using the recorded accelerations. The building was subjected to all the different UHS obtained in this research, so we could observe the earthquake demands if the building was in different zones along Mexicali.

Finally 204 UHS were computed for Mexicali, those are shown in Appendix A, and they are considered as Design Spectra for type B structures in Mexicali.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	2
RESUMEN.....	3
ABSTRACT	4
INDICE GENERAL.....	5
INDICE DE FIGURAS.....	7
Capítulo 1 Introducción y objetivos.....	10
1.1 INTRODUCCIÓN.....	10
1.2 Antecedentes.....	13
1.3 Sismos históricos.....	14
1.3.1 Sismos recientes	17
1.3.2 El sismo del 4 de abril de 2010	18
1.4 MODELO Y METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL PELIGRO SÍSMICO	19
1.5 Justificación.....	19
1.6 Objetivos	20
1.6.1 Objetivo General.....	20
1.6.2 Objetivos Específicos	20
1.7 Alcances	21
Capítulo 2 Reglamentaciones en Mexicali.....	22
2.1 Normas y especificaciones para el diseño estructural, 1968.	22
2.2 Reglamento de Edificación Estatal de BC, 1976.	23
2.3 Reglamento estatal de Baja California, 1992.....	26

2.4	NTC 2012 Sismo	26
	"Alcance	26
	Condiciones de análisis y diseño	26
	Zonificación.....	27
2.5	Variación de las cortantes basales de diseño para una misma estructura, utilizando las reglamentaciones estatales y municipales vigentes para Mexicali, BC.	30
Capítulo 3	Peligro sísmico de Mexicali.....	35
3.1	Leyes de Atenuación	40
3.2	Obtención de Espectros de Peligro Uniforme, EPUs.	41
3.3	MÉTODO DE INTERPOLACIÓN	42
Capítulo 4	Espectros de peligro uniforme	45
4.1	JUSTIFICACION DE ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME EN MEXICALI	45
4.2	Espectro en terreno firme para Mexicali	50
4.3	Efectos de sitio	53
Capítulo 5	Respuesta sísmica de estructuras	56
5.1	Estructuras típicas en Mexicali, Baja California	56
5.2	Estructuras susceptibles a daño.	58
5.3	Modelo matemático comparativo	60
5.3.1	Consideraciones para el Análisis	61
5.3.2	Estructuración y Propiedades del Modelo Matemático.	63
5.3.3	Revisión de Perfiles de cortante del modelo Comparativo.....	64
5.3.4	Variación en las cuantías de acero bajo diversos escenarios sísmicos	66
Capítulo 6	Conclusiones.....	67
6.1	Contribuciones y Conclusiones generales	67

6.2 Expectativas de investigación	69
Capítulo 7 Bibliografía.....	70
Apéndice A.....	75

INDICE DE FIGURAS

Figura I.1 Localización del municipio de Mexicali, en la República Mexicana.....	11
Figura I.2 Localización del Municipio de Mexicali, en el Estado de Baja California.....	11
Figura I.3 Regionalización Sísmica de México (CFE, 2008).....	12
Figura I.4 Distribución de las principales fallas activas asociadas al sistema San Andrés-Golfo. (Suarez, 2001).....	14
Figura I.5 Ubicación del epicentro del sismo del 4 de abril de 2010. (CISN).....	18
Figura II.1 Espectro de diseño sísmico (RBC-68).....	22
Figura II.2 Regionalización sísmica de Baja California (1976).....	24
Figura II.3 Espectro de diseño según reglamento de Baja California de 1976.	25
Figura II.4 Regionalización Sísmica de Baja California según las NTC-BC-12.....	28
Figura II.5 Espectro de diseño según reglamento de Baja California de 2012.....	29
Figura II.6 Imagen de vivienda típica de block hueco en Mexicali, (Google, 2016).....	30
Figura II.7 Modelo matemático de vivienda típica de block hueco en Mexicali.....	31
Figura II.8 Modelo de nave industrial de acero en Mexicali.....	32
Figura II.9 Grafica de los espectros de diseño de acuerdo a las distintas reglamentaciones de Mexicali.....	33

Figura II.10 Porcentajes de Cortantes basales de diseño para casa-habitación y nave industrial, normalizados por el cortante basal calculado con las NTC-BC-12 y suelo III.....	34
Figura III.1 Fuentes sísmicas que afectan Mexicali	38
Figura III.2 Fuentes sísmicas que afectan Mexicali.....	39
Figura III.3 EPU en la ciudad de Mexicali.	42
Figura III.4 Ubicación de EPUs en el Municipio de Mexicali.....	43
Figura III.5 Ubicación de EPUs en la ciudad de Mexicali.	44
Figura IV.1 Ubicación de estaciones de registro en el municipio de Mexicali, Baja California, respecto al epicentro del sismo del 4 de abril de 2010.....	46
Figura IV.2 Espectros calculados vs Espectro de Respuesta en el edificio del ejecutivo de Baja California.	47
Figura IV.3 Espectros calculados vs Espectro de Respuesta en Garita Centro.	47
Figura IV.4 Espectros calculados vs Espectro de Respuesta en Garita Oriente.....	48
Figura IV.5 Espectros calculados vs Espectro de Respuesta en Planta Geotérmica Cerro Prieto.....	48
Figura IV.6 Espectros calculados vs Espectro de Respuesta en Ejido Tamaulipas.	49
Figura IV.7 Espectros de peligro uniforme en la ciudad de Mexicali para un $T_r = 474.6$ años.....	50
Figura IV.8 Espectros de peligro uniforme en la ciudad de Mexicali para un $T_r = 474.6$ años Vs Espectro de diseño sísmico de las NTC2012 (Elástico) de Baja California.....	51
Figura IV.9 Espectros de Peligro Uniforme en el Valle de Mexicali para un $T_r = 474.6$ años Vs Espectro de diseño sísmico de las NTC2012 de Baja California.....	52
Figura IV.10 Espectro de Respuesta Vertical cercano al ejido Zacamato.....	54
Figura IV.11 Daños presentados en el valle de Mexicali por sismo de abril de 2010 (Colegio de ingenieros civiles de Mexicali).....	54
Figura V.1 Edificios Tipo 1 elaborados antes de que existiera la reglamentación local.....	56

Figura V.2 Edificios elaborados con Block de concreto.....	57
Figura V.3 Edificios de Acero.....	58
Figura V.4 Daños presentados en Mexicali, por el sismo de abril de 2010.....	59
Figura V.5 Fotografías del edificio del Ejecutivo del Estado de Baja California. (Martínez, 2011).....	61
Figura V.6. Ubicación de sismógrafo en la cubierta, y en el sótano, respectivamente (Martínez, 2011).....	61
Figura V.7 Espectros de piso dirección E-O del Edificio del PEBC.....	62
Figura V.8 Espectros de piso dirección N-S del Edificio del PEBC.....	63
Figura V.9 Vista del modelo tridimensional del edificio del PEBC con muros de cortante.....	64
Figura V.10 Perfil de cortantes del edificio del PEBC, bajo diferentes escenarios sísmicos dependiendo de la ubicación del edificio dentro del municipio de Mexicali.....	65
Figura V.11 Variación de las cuantías de acero en porcentaje, bajo diversos escenarios sísmico.....	66

INDICE DE TABLAS

Tabla I.1 Sismos históricos de la ciudad de Mexicali.....	15 Y 16
Tabla I.2 Eventos sísmicos de la ciudad de Mexicali a partir del año 2000.....	17
Tabla II.1 Coeficiente sísmico “C” de acuerdo con la regionalización sísmica de Baja California (1976).....	12
Tabla II.2 Coeficiente sísmico “C” de acuerdo a la regionalización sísmica de Baja California (2012).....	29
Tabla II.3 Comparativa de cortante basal de diseño en toneladas para Mexicali B.C. con diferentes reglamentaciones y espectros de peligro uniforme.....	33

Capítulo 1 Introducción y objetivos

1.1 INTRODUCCIÓN

Mexicali es cabecera municipal y la capital del estado de Baja California, México. Se localiza en el extremo noroeste del Valle de Mexicali en frontera con Estados Unidos de América, en las coordenadas 32° 39' 48" de latitud norte, por esto es la ciudad más septentrional de México y América Latina (Figura I.1 y I.2). En Mexicali se concentran las sedes de los poderes ejecutivo, legislativo y judicial del gobierno del estado de Baja California, así como las oficinas estatales del gobierno federal y del Ayuntamiento de Mexicali. Fundada el 14 de marzo de 1903 y es la capital más joven de la República Mexicana.

Se destaca a nivel nacional por registrar, en verano, una de las temperaturas más altas en México; así como, ser de las ciudades con más bajo nivel de precipitación anual y una de las zonas con mayor actividad sísmica de todo el país.

Mexicali es considerada una ciudad versátil por su crecimiento en el sector agropecuario, su impulso en el ramo industrial (en el área Aeroespacial principalmente), así como en el sector de servicios, destacando por el turismo médico. De acuerdo a la Encuesta Intercensal, 2015 efectuada por INEGI y publicada el 8 de diciembre de 2015, Mexicali se mantiene como la décimo tercera ciudad más poblada del país, con una población de 1,025,743 habitantes (INEGI, 2015).



Figura I.1 Localización del municipio de Mexicali, en la República Mexicana.



Figura I.2 Localización del Municipio de Mexicali, en el Estado de Baja California.

Los eventos sísmicos en el Municipio de Mexicali son relativamente comunes. Mexicali se ubica justo en la falla de San Andrés, donde hacen contacto las placas del Pacífico y la Norteamericana. Los sismos que se registran con aceleraciones de terreno superiores a 0.7 g, usualmente son mayores a $M_w = 7.0$. A Mexicali le corresponde una región sísmica categoría D, según la regionalización sísmica de México, publicada por la Comisión Federal de Electricidad en el 2008, en conjunto con el CENAPRED, figura I.3, (CENAPRED, 2001a) y (CFE, 2008).



Figura I.3 Regionalización Sísmica de México (CFE, 2008)

Para realizar el correcto diseño sísmico en un sitio determinado, la práctica adopta los valores máximos absolutos de desplazamiento, velocidad y aceleración del terreno, obtenidos a partir de los eventos registrados en la zona de interés. Estos parámetros presentan variaciones en magnitud de un sitio a otro, como consecuencia del cambio de las características geológicas del suelo; debido a que este no es un medio homogéneo, lo que genera que el diseño sísmico se vuelva cada vez más refinado, ya que los parámetros de un sitio son específicos de ese lugar y no deben emplearse en otro.

En este trabajo se proponen parámetros de diseño sísmico para Mexicali, de acuerdo con la metodología propuesta por Adams y Halchuk, (2003) Inca, (2013) y Juárez (2013). Con una base de datos con parámetros sísmicos, distribuidos geométricamente en una cuadrícula de 10 km, se evalúa la vulnerabilidad sísmica de estructuras típicas de la región. Todo lo anterior sirve para hacer una propuesta de diseño sismo-resistente adecuado a las demandas de la zona, que brinde seguridad y bienestar para la población en general.

1.2 Antecedentes

Los sismos afectan a las estructuras durante toda su vida útil, induciendo fuerzas laterales a las mismas debido a los eventos sísmicos. Por lo cual, hacer estudios de peligro sísmico, en zonas de alta sismicidad, es de gran importancia para elaborar estudios de riesgo sísmico que consideran la ocurrencia y las características de los sismos. Estos estudios proporcionan la información necesaria para evaluar distintos parámetros sísmicos para una probabilidad indicada, que se conoce como Espectro de Peligro Uniforme (EPU).

Es necesario diferenciar entre peligro y riesgo sísmico para determinar el potencial de daño en un sitio determinado. El peligro sísmico es la cuantificación de la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico específico en una zona dada. Por otro lado, el riesgo sísmico es la probabilidad de ocurrencia, dentro de un plazo dado, de que un sismo cause un cierto efecto definido como pérdida o daño en un lugar determinado (Nava, 1987). La gran diferencia radica en que el riesgo sísmico puede ser reducido por acciones del hombre, mientras que el peligro sísmico no.

Mexicali se ubica en una región de alto peligro sísmico ya que se encuentra ubicado entre las fallas: Imperial, Cerro Prieto, Cucapá y Michoacán 1, todas ellas corresponden a la falla de San Andrés, (Lira, 2005), figura I.4.

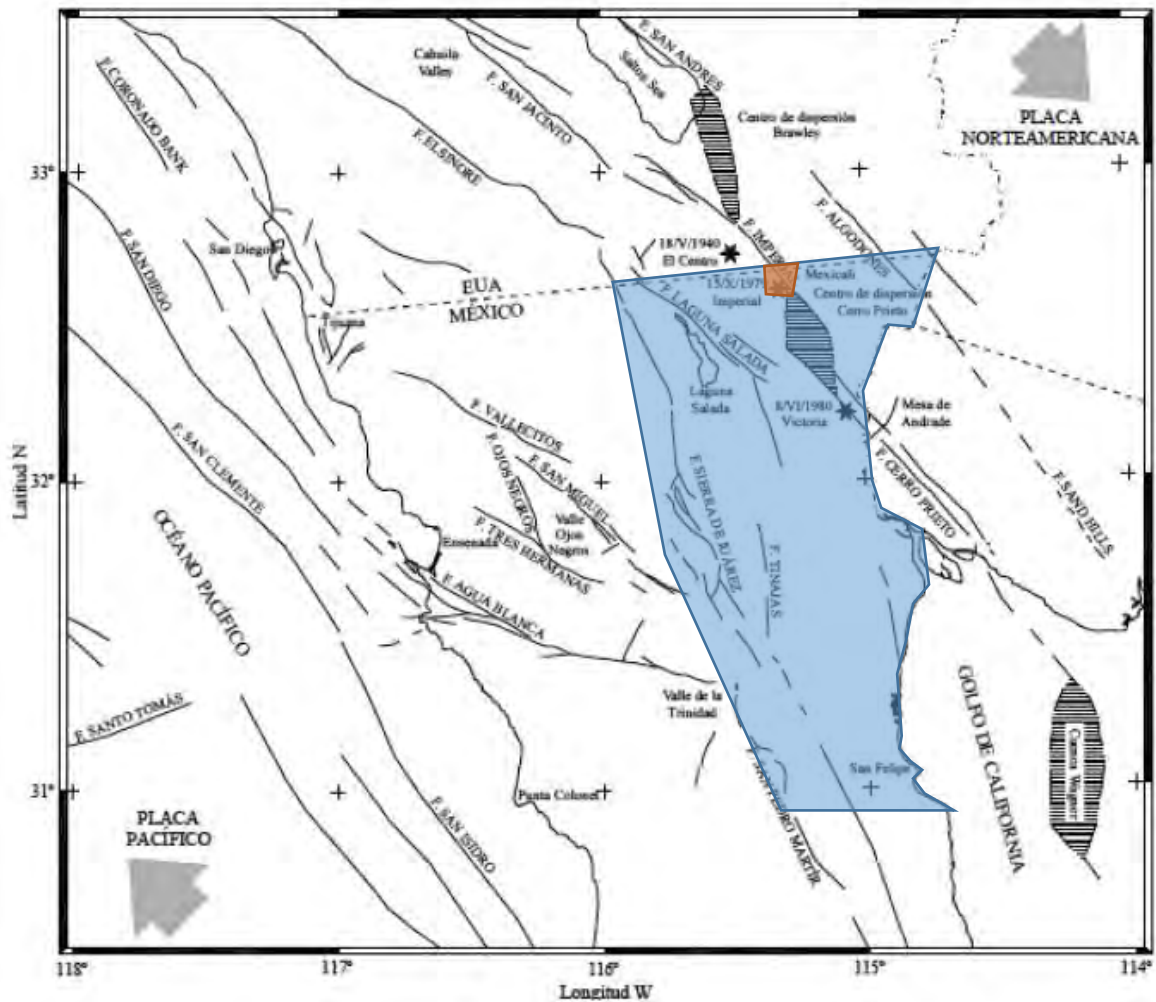


Figura I.4 Distribución de las principales fallas activas asociadas al sistema San Andrés-Golfo. (Suarez, 2001)

1.3 Sismos históricos

La ciudad de Mexicali, como ya ha sido mencionado, presenta una gran actividad sísmica a lo largo de su historia. Para conocer sobre la historia sísmica de la región, se recabo información de hemerotecas locales de Mexicali, reportes de eventos sísmicos de magnitud considerable, (ya que los eventos sísmicos comunes en Mexicali son eventos con magnitudes entre 3.5 a 5 Mw) que se hayan presentado en la región (Mayores a 5.4 Mw) previos a la instalación de instrumentos de medición en la ciudad, la información encontrada en el periódico “La voz de la frontera”, tabla I.1.

Tabla I.1 Sismos históricos de la ciudad de Mexicali.

ID	Fecha	Magnitud (Mw)	Epicentro	Comentarios
1	29 / nov / 1852	6.5	Oriente del valle de Mexicali	Agrietamiento en la arcilla de la zona cercana al Río Colorado y generó volcanes de lodo y géiseres en las proximidades al epicentro
2	15 / nov / 1875	6.2	Suroeste de Mexicali	
3	30 / jul / 1891	6.0	Delta del Río Colorado	
4	23 / feb / 1892	7.2	Laguna Salada	Debido a que la zona se encontraba inhabitada, no existen reportes de daños o afectaciones, pero se señala que Ensenada, El Álamo y San Quintín fueron sacudidas fuertemente.
5	24 / ene / 1903	6.6	Delta del Río Colorado	
6	19 / abr / 1906	6.2	Valle de Imperial	
7	22 / jun / 1915	6.0 y 5.9	Valle de Imperial	
8	20 / nov / 1915	7.1	Sur del Valle de Mexicali	Ocasionó agrietamientos en el fondo de la Laguna de los Volcanes y una erupción de vapor de corta duración (Basich, 1983).
9	01 / ene / 1927	5.8	Valle de Mexicali	
10	30 / dic / 1934	6.3	Valle de Mexicali	

Continuación.....Tabla I.1 Sismos históricos de la ciudad de Mexicali.

ID	Fecha	Magnitud (Mw)	Epicentro	Comentarios
11	18 / mayo / 1940	6.9	Calexico, Ca.	En la zona de falla de San Andrés hubo un desplazamiento horizontal de 2.92 metros en el monumento internacional 218 y de 2.87 metros en el cruce de la falla con la Línea Internacional a 10 km al este de Mexicali (Basich, 1983). La vía del ferrocarril Intercalifornia presentó desplazamientos en varios lugares. También hubo desplazamiento en los caminos y canales de los valles de Mexicali e Imperial.
12	15 / oct / 1979	6.5	Valle de Mexicali	De acuerdo con los registros, el temblor se sintió en todo Baja California, Sonora y Sur de California.
13	09 / jun / 1980	6.3	Valle de Mexicali	En un periodo de 24 horas a partir del primer evento se presentaron 50 temblores con distinta intensidad.
14	07 / feb / 1987	5.4	Valle de Mexicali	Generó aceleraciones de hasta 1.4 g (Suárez, 2001)
15	24 / nov / 1987	6.2 y 6.6	Salton Sea, Cal	

1.3.1 Sismos recientes

En la tabla I.2, se presenta la información sísmica del municipio de Mexicali de los últimos 20 años, la cual se ha caracterizado por enjambres de sismos de baja magnitud (menores a 5.0 Mw), pero con bastante recurrencia. Esta tendencia se mantiene hasta la actualidad y siendo el evento de 2010, el evento de mayor impacto en los últimos 15 años.

Tabla I.2 Eventos sísmicos de la ciudad de Mexicali a partir del año 2000.

ID	Fecha	Magnitud (Mw)	Epicentro	Comentarios
1	22 / feb / 2002	5.7	Sur de Mexicali	En un radio de 61 km, alrededor de la ciudad de Mexicali, se presentaron aproximadamente 1180 sismos, durante los meses de enero, febrero y marzo.
2	01 / ene / 2003 – 01/ ene / 2004	<5	Valle de Mexicali	Se presentaron 578 eventos de baja magnitud.
3	01 / ene / 2004 – 01/ ene / 2005	<5	Valle de Mexicali	Se presentaron 476 eventos de baja magnitud.
4	01 / ene / 2005 – 01/ ene / 2006	<5	Valle de Mexicali	Se presentaron 623 eventos de baja magnitud.
5	01 / ene / 2006 – 01/ ene / 2007	5.4	Valle de Mexicali	Se presentaron 525 eventos de baja magnitud.
6	01 / ene / 2007 – 01/ ene / 2008	<5	Valle de Mexicali	Se presentaron 346 eventos de baja magnitud.
7	01 / ene / 2008 – 01/ ene / 2009	<5	Valle de Mexicali	Se presentaron 1427 eventos de baja magnitud. Solo dos eventos presentaron una magnitud superior a 5 Mw.
8	01 / ene / 2009 – 01/ ene / 2010	<5	Valle de Mexicali	Se presentaron 823 eventos de baja magnitud. Solo tres eventos presentaron una magnitud superior a 5 Mw.

1.3.2 El sismo del 4 de abril de 2010

El 4 de abril de 2010, a las 15:40 (hora local) se presentó un sismo con magnitud $M_w = 7.2$, con una profundidad de 10 km y una duración de 89 segundos, seguido de más de 13 mil réplicas (al 31 de agosto del 2010), seis de las cuales alcanzaron magnitudes $M_w > 5.0$. Este evento ha sido el de mayor magnitud ocurrido en la zona desde 1892, y tuvo su epicentro en el valle de Mexicali, a 47 kilómetros al sureste de la ciudad (Figura I.5). El temblor se sintió en el norte del estado de Baja California y en el sur de California, Arizona y Nevada en los EEUU, (Meneses, 2010).

En este evento se observaron aceleraciones horizontales del terreno mayores a 0.5 g, estas aceleraciones se registraron en las zonas más cercanas al epicentro, y disminuyeron conforme la distancia se hacía más grande, de acuerdo con el trazo de la falla (Figura I.5). Asimismo, se reportó amplificación del movimiento del terreno en el ejido Michoacán de Ocampo donde se registró 1.1 g, (Meneses, 2010).

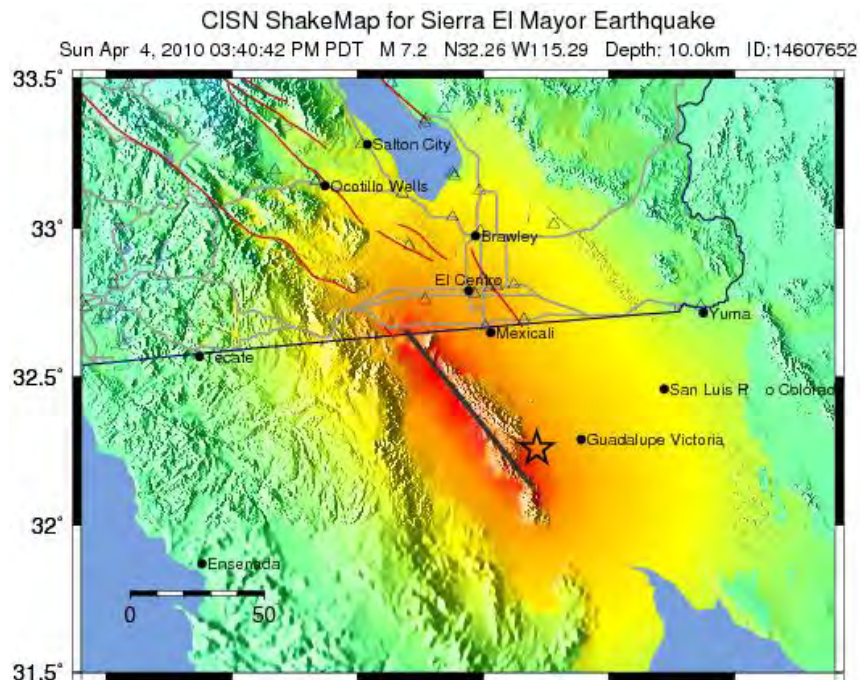


Figura I.5 Ubicación del epicentro del sismo del 4 de abril de 2010. (CISN)

1.4 MODELO Y METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL PELIGRO SÍSMICO

El cálculo del peligro sísmico es estadístico; la caracterización de modelos sobre la ocurrencia de un sismo, las zonas de fuentes sísmicas, las relaciones de magnitud-recurrencia y las leyes de atenuación de igual manera se realizan con estudios estadísticos (Cornell 1968, Esteva 1968 y McGuire 2004). Toda la información histórica y registros de los movimientos del terreno son esenciales.

Los estudios de peligro sísmico estiman de forma aproximada la probabilidad de que un evento sísmico ocurra. El peligro sísmico es la probabilidad de que un parámetro del movimiento del suelo, llegue a superar un nivel o valor esperado en un tiempo “t” de interés; y depende de la estructura del terreno y de la sismicidad de las fuentes que intervienen en una región. Comúnmente se considera que la información más importante que podemos obtener de un evento sísmico son la intensidad y la aceleración dejando de lado efectos de sitio ya que son las dos variables más sencillas de obtener debido que la primera se obtiene por medio de la escala de Mercalli y la segunda por medio de equipos o estaciones acelerométricas. Para obtener el peligro sísmico es necesario analizar toda la evidencia geológica fallas y actividades registradas, áreas de ruptura y desplazamientos. El peligro sísmico se puede determinar por medio de enfoques probabilistas o deterministas.

1.5 Justificación

Los sismos no se presentan con lugar, fecha y hora definida, pero si tienen una característica peculiar que es la recurrencia, es decir, un sismo con las mismas características se puede volver a presentar en un determinado tiempo en la región (Periodo de retorno). En la actualidad existen diversos estudios que describen la recurrencia en las principales zonas de alta sismicidad de la República Mexicana, resultando en estudios de peligro sísmico que

además dependen de diversos factores como la distancia del epicentro, tipo de suelo y otros.

Un estudio de peligro sísmico da como resultado parámetros sísmicos que son de gran utilidad para diseños sismo-resistentes de estructuras. En este trabajo se obtendrán parámetros y especificaciones de diseño sísmico en terreno firme para la ciudad de Mexicali, B.C., sin contemplar efectos de sitio, la licuación y la componente vertical de los sismos.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

El objetivo general del presente trabajo es la elaboración de una propuesta de diseño sismo-resistente para el municipio de Mexicali, B.C.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Determinar el peligro sísmico para la ciudad de Mexicali, B.C.
- Elaborar una base de datos con parámetros sísmicos de la región
- Caracterizar las estructuras típicas de Mexicali.
- Determinar la vulnerabilidad sísmica de las estructuras típicas.
- Determinar la demanda sísmica de algunas edificaciones típicas.
- Comparar los parámetros sísmicos obtenidos en este estudio contra los presentados en la reglamentación local de Mexicali.
- Proponer espectros de diseño o parámetros sísmicos para Mexicali, B.C.

1.7 Alcances

Se deben identificar y caracterizar las fuentes sismogénicas para el sitio de estudio correspondiente al municipio de Mexicali, B.C., una vez identificadas las fuentes sísmicas se procede a superponer una malla en el municipio de Mexicali con puntos de interés a cada 10 km. En cada sitio de interés, se obtendrán espectros de peligro uniforme (EPUs) para terreno firme. Para poder elaborar espectros de peligro uniforme, es necesario utilizar leyes de atenuación sísmica aplicables a la zona de estudio. En el caso de este trabajo la selección de dichas leyes se basó en literaturas actuales. Utilizando leyes de atenuación propias del sur de California.

Como se menciona en el párrafo anterior los parámetros sísmicos que se obtienen con este trabajo, son únicamente aplicables para “Terreno firme” en el municipio de Mexicali, por lo tanto los parámetros que se obtengan, no consideran efectos de sitio, como pueden ser la licuación que se presenta en varias zonas del municipio. De igual manera se propone realizar una caracterización de la infraestructura urbana en Mexicali, sin embargo, analizar la vulnerabilidad estructural de ellas se encuentra fuera de los alcances de este trabajo, aunque se tiene pensado evaluar una estructura, bajo los distintos parámetros sísmicos que se obtengan en este trabajo, con la finalidad de observar cómo cambiaría su diseño estructural.

Capítulo 2 Reglamentaciones en Mexicali

Antes de proseguir con las reglamentaciones en Mexicali se define que es una estructura del tipo B según la reglamentación local actual: “Son aquellas estructuras cuya falla ocasionaría pérdidas de magnitud intermedia, tales como plantas industriales, bodegas ordinarias, comercios, bancos, restaurantes, casa habitación, edificios de apartamentos y oficinas, bardas cuya altura exceda de 1.80 m y todas aquellas estructuras cuyas fallas por movimiento sísmico pueda poner en peligro otras construcciones de este grupo ”.

2.1 Normas y especificaciones para el diseño estructural, 1968.

La ciudad de Mexicali, Baja California tiene más de 100 años, sin embargo, las reglamentaciones en la región son más modernas. El primer reglamento con características sísmicas que se implementó en el estado de Baja California, fue el reglamento “Normas y especificaciones para el diseño estructural de las construcciones en el estado de Baja California” de 1968. El cual presentaba el siguiente espectro de diseño para estructuras del tipo B, caracterizado en la figura II.1:

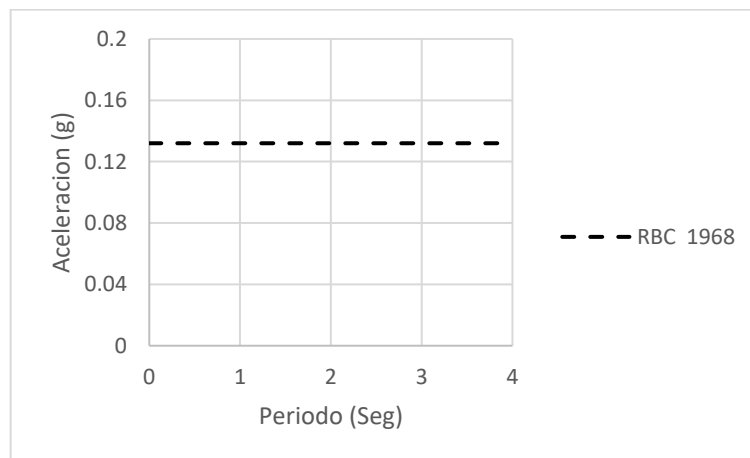


Figura II.1 Espectro de diseño sísmico (RBC-68).

2.2 **Reglamento de Edificación Estatal de BC, 1976.**

En el año de 1976, el estado de Baja California presentó su primer reglamento de edificación estatal. En él se consideraban diferentes tipos de suelo de la región, con el propósito de considerar los efectos del suelo durante un evento sísmico. También incluyó una regionalización sísmica estatal (Figura II.2) y una tabla para la elaboración de un espectro de diseño, considerando los parámetros anteriores (Tabla II.1), para un mejor entendimiento de esta tabla se presenta de manera gráfica los valores de la misma (Figura II.3).

El reglamento define a los suelos de BC en tres tipos:

Suelo Tipo I: Terreno firme, tal como arenisca medianamente cementada, arcilla muy compacta.

Suelo Tipo II: Suelo de baja rigidez, tal como arenas no cementadas o limos, de mediana o alta compacidad, arcillas de mediana compacidad.

Suelo Tipo III: Arcillas blandas, muy compresibles.

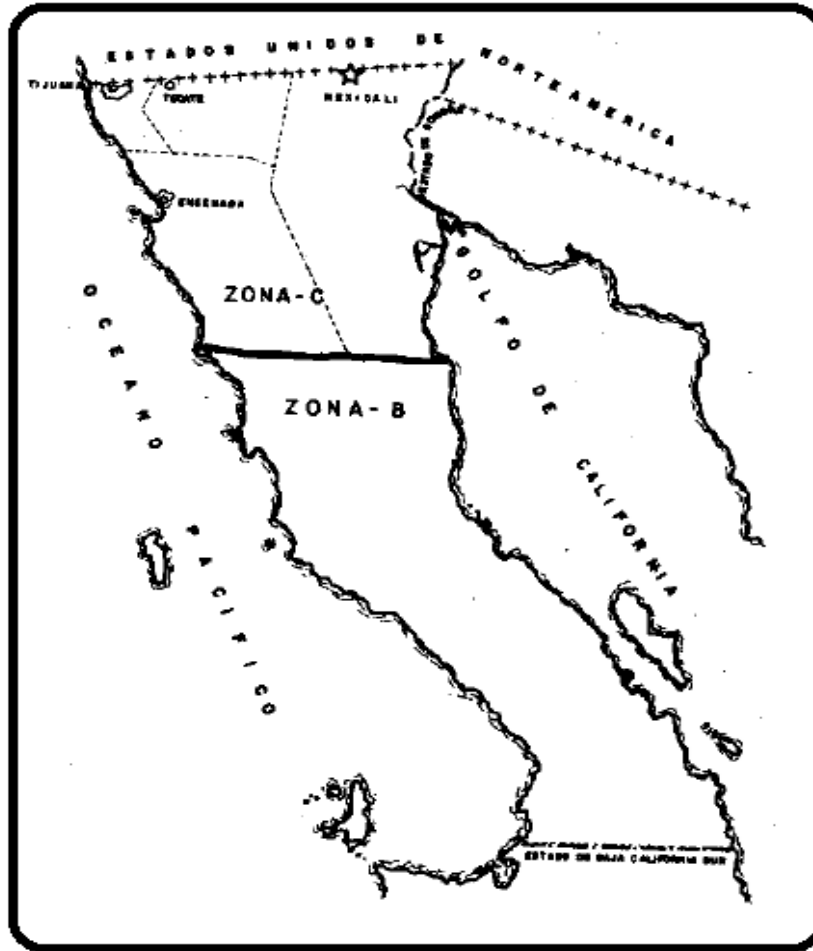


Figura II.2 Regionalización sísmica de Baja California (1976)

Tabla II.1 Coeficiente **sísmico “C”** de acuerdo con la regionalización sísmica de Baja California (1976)

Zona	ao	Suelo	c	Ta	Tb	r
B	0.08	I	0.16	0.40	0.60	1.00
	0.08	II	0.2	0.75	1.50	1.00
	0.08	III	0.24	1.00	2.50	1.00
C	0.12	I	0.24	0.30	0.50	1.00
	0.12	II	0.3	0.60	1.20	1.00
	0.12	III	0.36	0.80	2.20	1.00

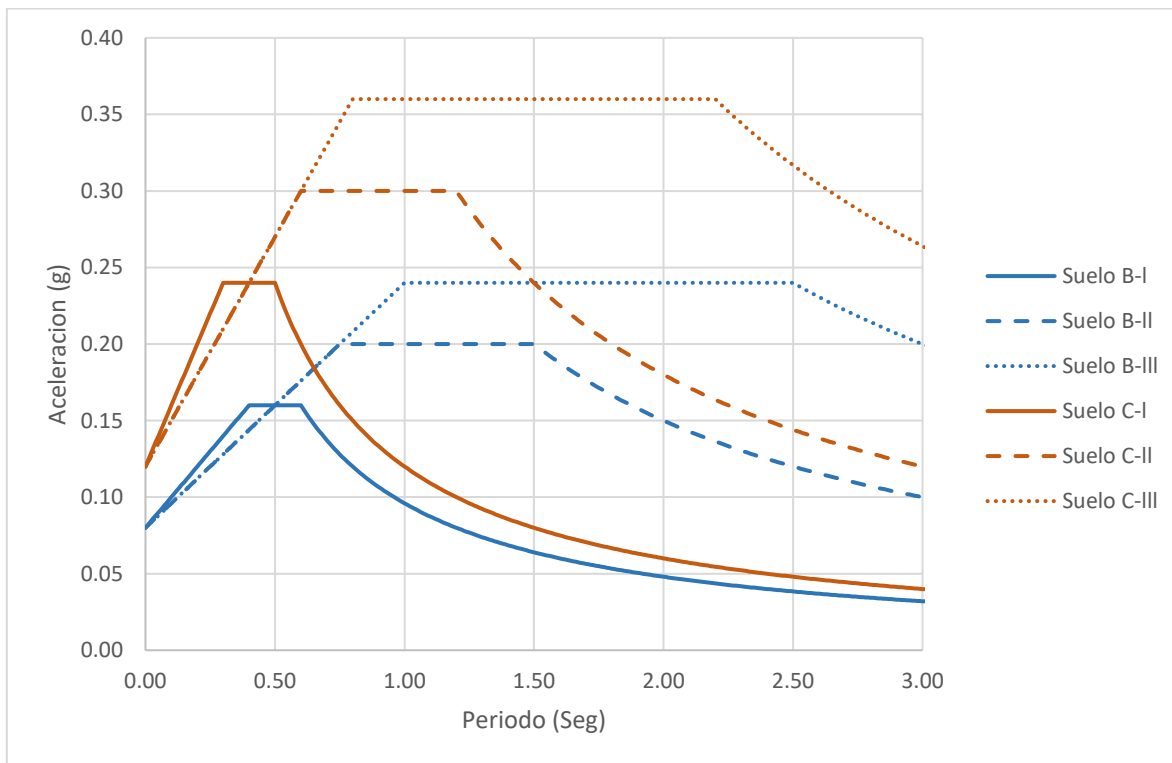


Figura II.3 Espectro de diseño según reglamento de Baja California de 1976.

En la figura II.2 se observa que las zonas urbanas del estado de Baja California se encuentran dentro de la región delimitada “zona c”, correspondiente a los mayores valores de aceleración según la Tabla II.1. Esta Tabla presenta diversas demandas espectrales que varían con el tipo de suelo. El suelo “tipo III” es el que presenta las mayores demandas espectrales. Esta caracterización de suelos se mantuvo hasta en los reglamentos actuales; el suelo “tipo III” se define para la ciudad de Mexicali y el suelo “tipo I”, para el resto de las zonas urbanas del estado.

2.3 **Reglamento estatal de Baja California, 1992.**

Para el año de 1992 el gobierno del estado decidió actualizar el reglamento estatal de Baja California, el apartado de diseño sísmico se mantuvo sin cambio, esto incluye el capítulo de análisis dinámico. Después del sismo que se presentó el 4 de abril de 2010, se decidió actualizar el reglamento con la elaboración de Normas Técnicas Complementarias para Diseño Sísmico:

2.4 **NTC 2012 Sismo**

La norma de diseño sísmico de las NTC-BC 2012 se cita a continuación:

“Alcance

Los requisitos de estas Normas tienen como propósito obtener una seguridad adecuada tal que, bajo el sismo máximo probable, no habrá fallas estructurales mayores ni pérdidas de vidas, aunque pueden presentarse daños que lleguen a afectar el funcionamiento del edificio y requerir reparaciones importantes.

El Director Responsable de Obra, de acuerdo con el propietario, puede decidir que se diseñe el edificio para que satisfaga requisitos más conservadores que los aquí establecidos, con el fin de reducir la probabilidad de pérdidas económicas en la construcción a cambio de una inversión inicial mayor. (NTC, Diseño Sísmico, 2012)

Condiciones de análisis y diseño

Las estructuras se analizarán bajo la acción de dos componentes horizontales ortogonales no simultáneos del movimiento del terreno. Las deformaciones y

fuerzas internas que resulten se combinarán entre sí como lo especifican estas Normas, y se combinarán con los efectos de fuerzas gravitacionales y de las otras acciones que correspondan, según los criterios que establecen las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones.

En el análisis se tendrá en cuenta la contribución a la rigidez de todo elemento, estructural o no, que sea significativa. Con las salvedades que corresponden al método simplificado de análisis, se calcularán las fuerzas sísmicas, deformaciones y desplazamientos laterales de la estructura, incluyendo sus giros por torsión y teniendo en cuenta los efectos de flexión de sus elementos y, cuando sean significativos, los de fuerza cortante, fuerza axial y torsión de los elementos, así como los efectos geométricos de segundo orden, entendidos éstos últimos como los que producen las fuerzas gravitacionales que actúan en la estructura deformada por la acción de dichas fuerzas y de las laterales.

Zonificación

Para los efectos de estas Normas se considerarán las zonas del Estado de Baja California en B, C y D. En especial, el Municipio de Mexicali abarca la zona D.” (Figura II.4)



Figura II.4 Regionalización Sísmica de Baja California según las NTC-BC-12

En las NTC-BC-12 se presentan diversos espectros de diseño sísmico en relación a la zona y tipo de suelo, de acuerdo con la zonificación estatal propuesta en las NTC-BC-2012, en la tabla II.2 se indican los parámetros a utilizar para la realización de los espectros de diseño contemplados en la norma.

Tabla II.2 Coeficiente sísmico “C” de acuerdo a la regionalización sísmica de Baja California (2012)

Zona	ao	Suelo	c	Ta	Tb	r
B	0.08	I	0.17	0.09	0.60	0.67
	0.08	II	0.21	0.09	0.60	0.67
	0.08	III	0.25	0.09	0.60	0.67
C	0.12	I	0.25	0.11	0.65	1.00
	0.12	II	0.32	0.11	0.65	1.00
	0.12	III	0.38	0.11	0.65	1.00
	0.06	Ia	0.24	0.10	0.60	0.67
	0.08	IIa	0.26	0.14	1.00	1.00
	0.12	IIIa	0.36	0.20	1.00	1.33
	0.16	IIIb	0.38	0.20	1.20	1.33
D	0.25	I	0.29	0.13	0.70	1.33
	0.25	II	0.36	0.13	0.70	1.33
	0.25	III	0.44	0.13	0.70	1.33

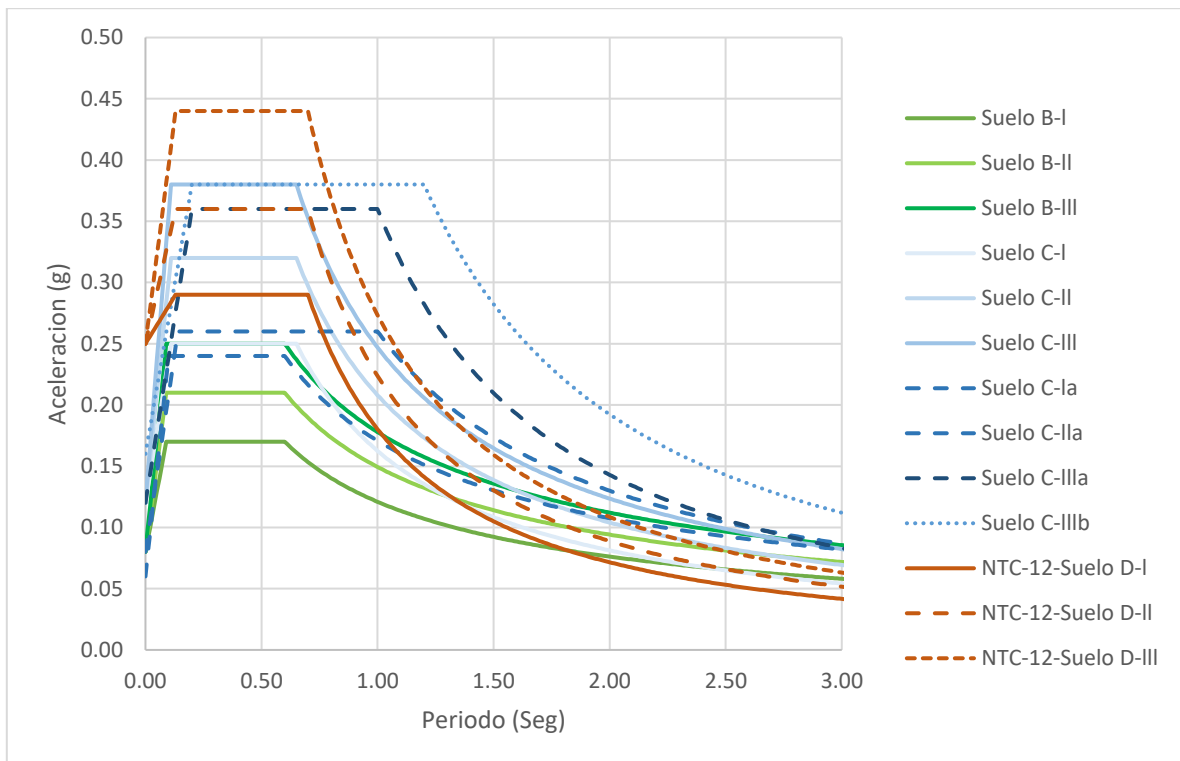


Figura II.5 Espectro de diseño según reglamento de Baja California de 2012.

2.5 Variación de las cortantes basales de diseño para una misma estructura, utilizando las reglamentaciones estatales y municipales vigentes para Mexicali, BC.

A continuación, se presenta una comparación, para dos estructuras típicas de la Ciudad de Mexicali – una casa habitación y una nave industrial, de los cortantes basales calculados con tres reglamentaciones – 1968, 1972-1992 y 2012. Las dos estructuras seleccionadas se van a describir en el Capítulo 5, que corresponde al de estructuras típicas de Mexicali, BC.

Como primer modelo comparativo se utilizó una de las estructuras más comunes de la ciudad de Mexicali; una vivienda típica de la ciudad con dos plantas, la estructura está conformada por block hueco de concreto y celdas coladas a manera de castillos en su interior. Como sistema de piso y cubierta utiliza una losa sólida de concreto de 10 cm de espesor (figura II.6).

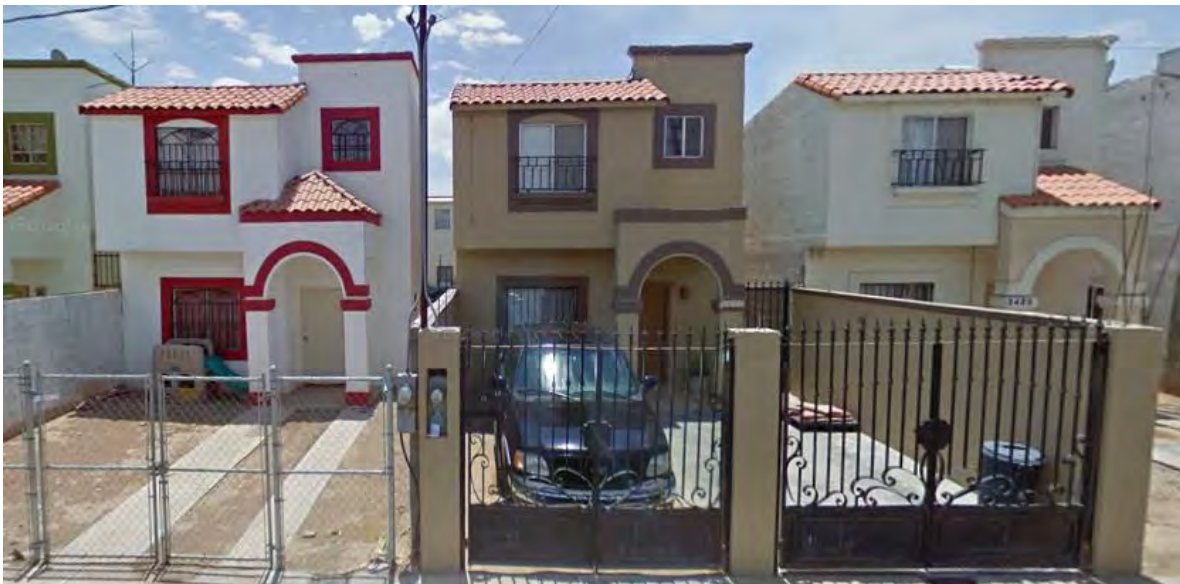


Figura II.6 Imagen de vivienda típica de block hueco en Mexicali, (Google, 2016).

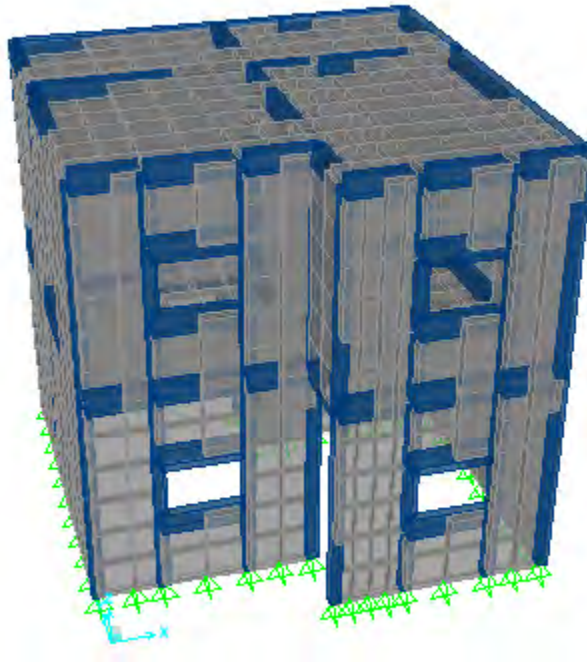


Figura II.7 Modelo matemático de vivienda típica de block hueco en Mexicali.

En la Figura II.7 se muestra el modelo matemático de la estructura para la vivienda presentada en la figura II.6. Las ventanas y puertas de acceso se encuentran en la cara frontal y posterior de la vivienda y los muros laterales no presentan huecos de ventana, por esta razón la vivienda presenta mayor rigidez en uno de sus ejes. El modelo presenta una bajada de cargas a la cimentación de 100 toneladas y un periodo fundamental de 0.16 segundos.

Para la nave industrial, se consideró una nave de 15,000 m², los detalles de geometría y de información estructural fue proporcionada por la empresa Construcción y Diseños Calo S.A. de C.V. de Mexicali, con esta información fue posible el modelo matemático de la nave industrial, Figura II.8.

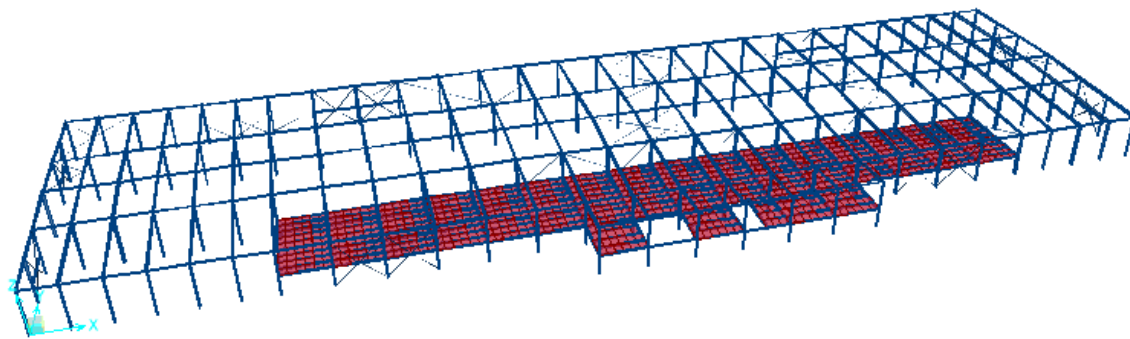


Figura II.8 Modelo de nave industrial de acero en Mexicali.

En la figura anterior se muestra una estructura de acero, típica del sector manufacturero de Mexicali, elaborada por medio de marcos rígidos de acero en una sola dirección, sujetos entre sí por elementos de cortante, se consideró un sistema de cubierta flexible. La nave industrial presenta una bajada de cargas de 47,00 toneladas y un periodo fundamental de 1.30 segundos.

En la figura II.9 se muestra cómo varían las ordenadas del espectro de diseño, para la nave industrial $T = 1.3$ s, si esta se diseñara con las diferentes reglamentaciones sísmicas de Mexicali. En la Tabla II.3 se muestran los valores del cortante basal de diseño (V_b). Este se calculó utilizando las reglamentaciones de 1968, 1972 y 2012 para Mexicali, BC. El cortante basal de diseño se obtuvo con: análisis estático, considerando estructuras de un grado de libertad, para la casa-habitación ($W = 100$ ton y $T=0.16$ s), para la nave industrial ($W = 4,700$ ton y $T= 1.3$ s).

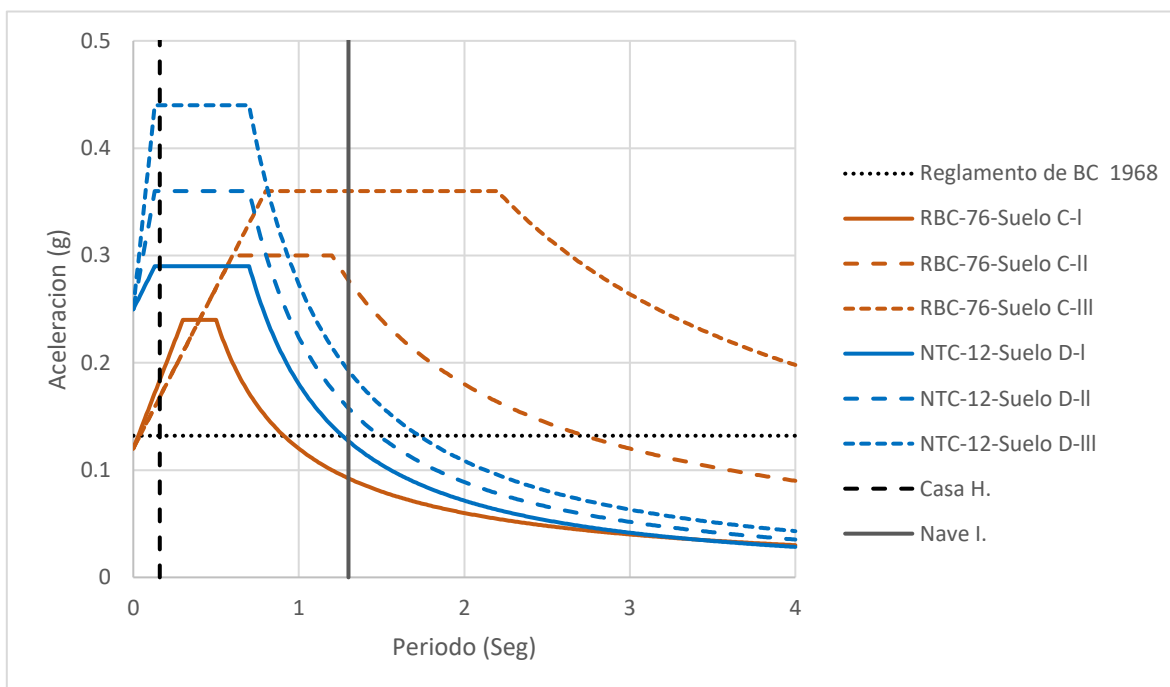


Figura II.9 Grafica de los espectros de diseño de acuerdo a las distintas reglamentaciones de Mexicali.

Tabla II.3 Comparativa de cortante basal de diseño en toneladas para Mexicali B.C. con diferentes reglamentaciones y espectros de peligro uniforme.

Comparación de cortantes basales según las reglamentaciones del estado de Baja California (ton)			
Reglamento	Tipo de Suelo	Casa H.	Nave I.
RBC-1968		14.93	566.77
RBC-1976-92	I	19.12	535.60
	II	17.73	1285.69
	III	17.73	1538.84
NTC-2012	I	32.54	891.17
	II	40.01	1106.28
	III	49.76	1187.37
EPU Probabilista tr= 474.6 años	F S.A.	127.38	1946.94
	Ej. Dur.	49.60	757.33
	San Felipe	29.30	395.19

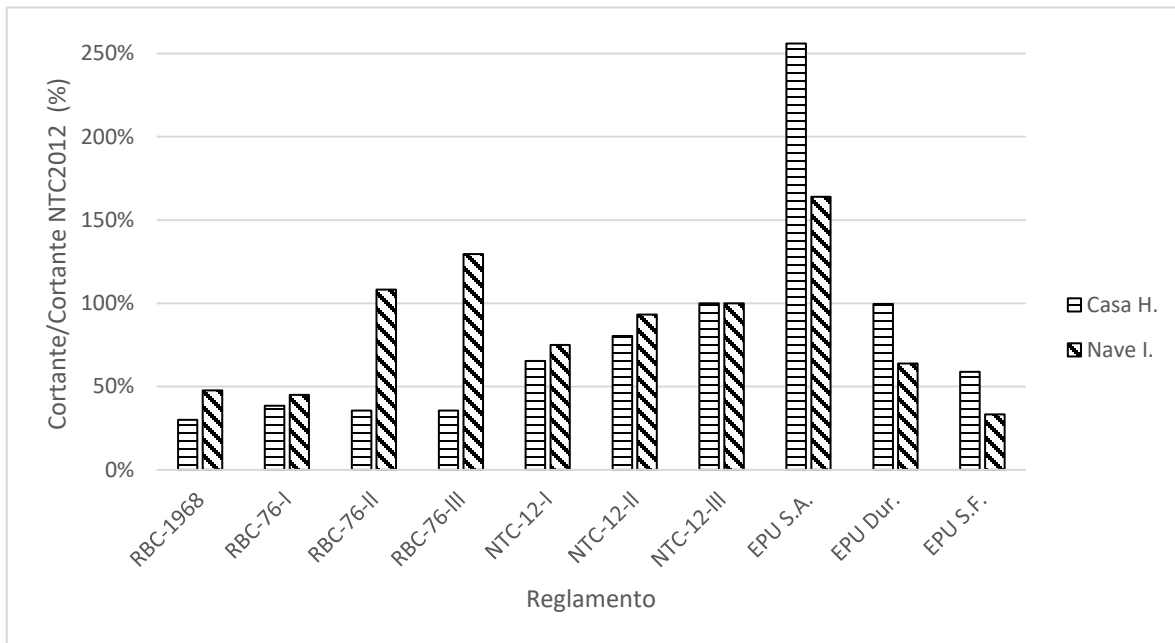


Figura II.10 Porcentajes de Cortantes basales de diseño para casa-habitación y nave industrial, normalizados por el cortante basal calculado con las NTC-BC-12 y suelo III.

En la figura II.10 se observa que la reglamentación actual (NTC-BC-12) del estado demanda mayores V_b a las estructuras de periodo corto, como es el caso de la casa habitación. Los valores aumentan en 1.4 veces para las NTC-12. Para estructuras de periodo largo, para la nave industrial, las NTC-12 demandan la mitad del V_b del exigido en 1972. Para estructuras de periodo corto, $T \leq 0.50$ s, construidas antes de 2012, presentan un V_b de diseño menor; por lo que en eventos sísmicos futuros pudieran presentar un desempeño sísmico poco favorable. Además, para estructuras con $T > 0.5$ s, los V_b de diseño son menores.

Los espectros de diseño sísmico de la ciudad muestran distintos periodos fundamentales de influencia; por lo que es necesario realizar un estudio de Peligro Sísmico, con la finalidad de determinar las demandas sísmicas en diferentes lugares del municipio de Mexicali, Baja California.

Capítulo 3 Peligro sísmico de Mexicali

Mexicali se ubica en una región altamente sísmica, y el Manual de Obras Civiles de la CFE cataloga a la región como Zona D. En el municipio se ha realizado poca investigación de ingeniería sísmica; la que se ha realizado se enfoca en la ubicación de fallas geológicas de la región, pero no se ha estudiado su potencial sísmico. Sin embargo, la falla de San Andrés ha sido estudiada más a fondo, de acuerdo con los investigadores del sur de California, podría generar un sismo de magnitud cercana a $M_w = 9.0$. Con esto en mente, es necesario desarrollar un estudio de peligro sísmico para Mexicali. En este trabajo se obtuvieron espectros de peligro uniforme (EPUs), con periodos de retorno de 500, 1000 y 2500 años aproximadamente; los cuales pueden cumplir la función de espectro de diseño sísmico para estructuras tipo B, A y AA respectivamente. En este trabajo se obtuvieron EPUs con periodos de retorno de 500 años. Para comprender mejor el significado de “peligro sísmico” se presentan las acepciones al concepto presentadas por Inca (2013).

1. El peligro sísmico es cualquier fenómeno físico asociado con un sismo (movimiento del terreno, falla del terreno, licuación y tsunami) y sus efectos sobre el uso del suelo, las estructuras hechas por el hombre, y los sistemas socio-económicos, que tienen el potencial de producir daño o pérdida (Bormann et al., 2003). Ejemplos de ello, son la amplitud del movimiento sísmico en cierto intervalo, las olas inducidas por un tsunami que alcanzan cierta elevación en un puerto, etc.
2. Los resultados de un análisis de peligro indican la probabilidad de que ocurra un nivel determinado de movimiento sísmico del terreno, en un punto específico, dentro de cierto periodo de tiempo (Bormann et al., 2003; Thenhaus y Campbell, 2003). En este caso, el peligro sísmico suele ser calculado como la frecuencia (número de veces por unidad de tiempo), en que una amplitud del movimiento sísmico del terreno será mayor que un valor especificado (McGuire, 2004).

Para realizar la evaluación de peligro sísmico, es necesario seleccionar qué parámetro o parámetros evaluarán la excitación del suelo. De acuerdo a (Herraiz, 1997), los ingenieros nos enfocamos en la intensidad y aceleración máxima como los conceptos más aceptados en los análisis de peligrosidad.

Los análisis de peligro sísmico, parten de la premisa de considerar que los sismos que ocurrirán en el futuro tendrán las mismas características que los sucedidos en el pasado, por lo que es importante conocer el historial sísmico de la zona de estudio. Según (Duarte y Campos-Costa, 1992), los sismos son fenómenos no estacionarios que presentan una probabilidad de ocurrencia distinta antes y después de un terremoto de notable magnitud. Ejemplos de estas características se tiene en la región de interés, donde aproximadamente cada 13 años se presenta un evento de magnitud mayor a $M_w = 6.0$, mientras que sismos de magnitud $M_w = 4.0$ se presentan con mayor frecuencia en la región.

Al momento de realizar un análisis de peligro sísmico es necesario, identificar y evaluar todas las fuentes de actividad sísmica de la región de estudio. Por lo cual se debe revisar: la evidencia geológica (identificar fallas y el tipo de actividad que registran) y la correlación entre la magnitud de sismos con la longitud, área de ruptura y desplazamientos de fallas mediante correlaciones que permitan evaluar y predecir magnitudes de sismos esperados (Kramer, 1996).

Para la realización de un análisis de peligro sísmico se pueden considerar dos enfoques o metodologías para llevar a cabo el análisis, los cuales son el enfoque determinista y probabilista.

- a) Enfoque determinista: Toma como partida la sismicidad registrada en la zona de estudio, de la cual se estima el máximo potencial sísmico de la región y se le denomina sismo característico, y considera que si ya ocurrió en algún momento este volverá a repetirse en la región.

- b) Enfoque Probabilista: Está basado en el historial de sismicidad, y el peligro se estima sumando todas las fuentes consideradas (Reiter, 1990 y Kramer, 1996). Esto proporciona una curva de probabilidad anual de superación de diferentes parámetros sísmicos. El inverso de la probabilidad anual de excedencia se llama periodo de retorno, que indica el número de años en el que se espera la superación del nivel elegido. Esto se hace sólo en una extensión pequeña, y la homogeneidad de la muestra de sismos por lo que es limitada (Jerónimo, 2015).

Este enfoque utiliza dos modelos:

- Modelo de sismicidad, describe la distribución grafica de las fuentes del evento y magnitudes, mediante relaciones de atenuación del movimiento fuerte del suelo.
- Modelo de atenuación describe efectos sobre un sitio mediante magnitud distancia de fuentes a sitios, tipo de suelo, etc.

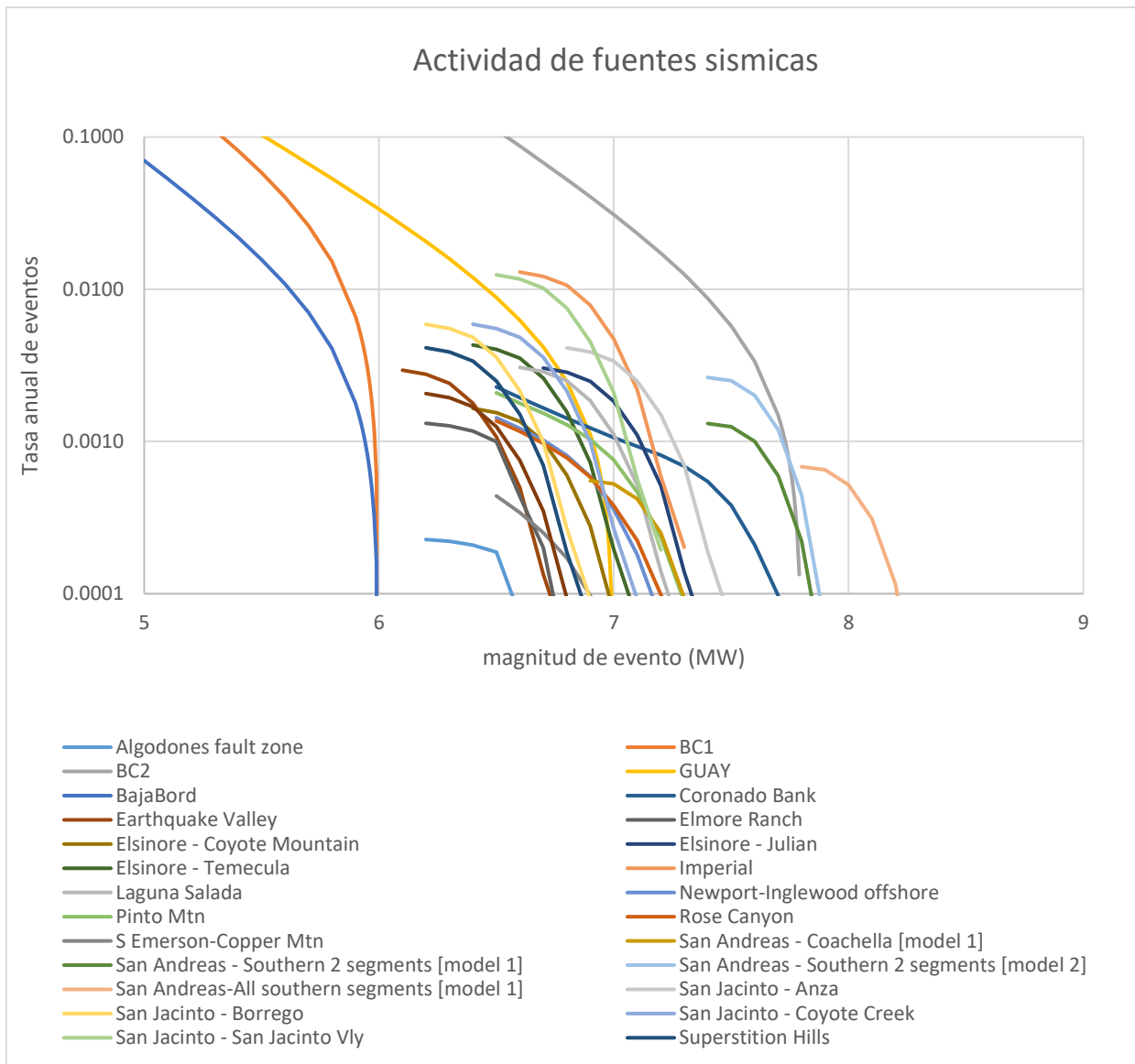
Una vez conocida la sismicidad de las fuentes y patrones de atenuación de las ondas generadas en cada una de ellas, incluyendo los efectos de la geología, puede calcularse el peligro sísmico considerando la suma de los efectos de la totalidad de las fuentes sísmicas y la distancia entre cada fuente y el sitio de interés (Jerónimo, 2015).

Para este trabajo la Metodología que se utilizó es mediante el enfoque probabilista y determinista, por lo que fue necesario buscar qué fuentes sismogénicas presentan una aportación importante para el sitio de interés, para ello se localizó el sitio de estudio y se

estimó un radio de 350 km (figura III.1). Posteriormente a este paso, se llevó a cabo un estudio para visualizar la cantidad de energía que puede desarrollar cada falla y como se presentaría esa energía en la región (magnitud máxima vs la probabilidad de eventos anuales, figura III.2).



Figura III.1 Fuentes sísmicas que afectan Mexicali.



De la figura III.2 se observa que la mayoría de las fuentes sismogénicas presentan potencial sísmico de magnitud mayor a 6 (escala de Richter), y un periodo de retorno de 1000 años. También se logra apreciar que la fuente sismogénica que presenta el mayor aporte en los movimientos sísmicos en la región es la fuente BC2 mejor conocida como falla de San Andrés.

3.1 Leyes de Atenuación

Para la realización de los EPU es necesario el uso de Leyes de Atenuación, las cuales son útiles para considerar efectos particulares del sitio o de la fuente sismogénica, a continuación se presentan las leyes de atenuación utilizadas para la estimación del peligro sísmico en Mexicali, B.C.

- (Sadigh, 1997): Afecta principalmente a la aceleración pico del suelo y sólo puede utilizarse en fuentes sísmicas de falla normal o inversa, magnitudes entre $4.0 < M_w < 8.0$ y distancias no mayores a 100 km.
- (Boore y Fumal, 1997): Funciona para estimar espectros de respuesta horizontal y aceleración pico del suelo de los terremotos característicos del estado de California en EUA, y sitios con velocidades de ondas de corte superior a 30 m/s .
- (Campbell y Bozorgnia, 2008): Para las fallas típicas de la zona de California, útil para calcular empíricamente la aceleración máxima del terreno (PGA), de acuerdo a un espectro de respuesta elástico. Su uso se encuentra limitado para eventos en un intervalo de $4.0 < M_w < 8.5$ y una distancia no mayor a 200 km.
- (Abrahamson y Silva, 2008): Para estimaciones del movimiento horizontal del terreno, generado por sismos superficiales, con la base de datos PEER NGA. El modelo es aplicable a magnitudes entre $5.0 < M_w < 8.5$, distancias 0 a 200 km, y períodos espectrales de 0 a 10 segundos. En lugar de las categorías genéricas de sitio (suelo y roca), el sitio está parametrizado por la velocidad media de onda de corte en los 30 m superiores de terreno (V_{s30}). Los efectos no lineales del sitio están limitados por modelos lineales equivalentes.
- (Chiou y Youngs, 2008): Presenta un modelo para estimar las amplitudes horizontales del movimiento del suelo, causadas por terremotos superficiales que ocurren en entornos tectónicos activos. El modelo proporciona relaciones predictivas para la componente horizontal media

independiente de la orientación de los movimientos. Las relaciones se proporcionan para la aceleración máxima, la velocidad máxima y la aceleración pseudoespectral amortiguada de 5%, para períodos espectrales en un intervalo entre 0.01 a 10 segundos. El modelo representa una actualización de las relaciones desarrolladas por (Sadigh y otros, 1997) e incluye formas mejoradas de escala de magnitud y distancia. Los efectos del sitio están representados por funciones de velocidad media de onda de corte de los 30 m superiores de terreno (V_{s30}) y la profundidad del sedimento. El nuevo modelo predice el movimiento del suelo mediano que es similar al de (Sadigh y otros, 1997) en períodos espectrales cortos, pero movimientos de tierra más bajos en periodos largos. El nuevo modelo produce movimientos de tierra ligeramente más bajos en el intervalo de distancia de 10 a 50 km y movimientos de tierra más grandes a mayores distancias.

3.2 Obtención de Espectros de Peligro Uniforme, EPU.

Los espectros de peligro uniforme, como su nombre lo dice, presentan la misma posibilidad de peligro para los distintos periodos de las estructuras en la región, dado un Periodo de retorno. A manera de ejemplo presenta un evento único donde todos los periodos estructurales tienen la misma posibilidad de estar en resonancia. De acuerdo a las leyes de atenuación antes mencionadas y al enfoque probabilista, se utilizó el programa EZ-Frisk 7.65 para llevar a cabo un análisis de peligro sísmico. Para eso fue necesario indicar y considerar en el estudio todas las fuentes sísmicas que pueden aportar sismos al sitio de estudio, calculando EPU para periodos de retorno de 474.6, 974.8 y 2474.9 años (figura III.3).

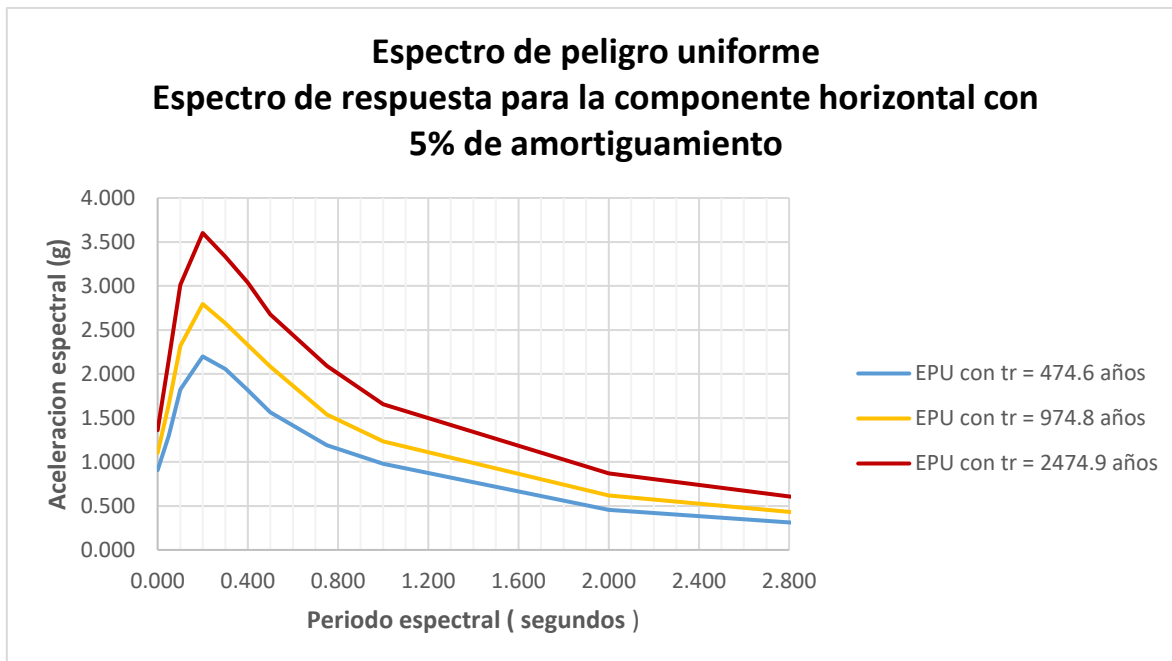


Figura III.3 EPU en la ciudad de Mexicali.

En la figura III.3 se presentan los espectros de peligro uniforme para una ubicación dentro de la ciudad de Mexicali, con periodos de retorno de 500, 1,000 y 2,500 años. Se aprecia de ésta que para estructuras de tipo B, presenta una aceleración mayor a 1.2 g para un periodo $T_s = 0.20$ segundos, lo que indica que estructuras cercanas a ese periodo en la ciudad pueden ser susceptibles a mayor daño.

3.3 MÉTODO DE INTERPOLACIÓN

Debido a que la extensión territorial del municipio es basta (alrededor de 12,500 km²), calcular el EPU de un punto y aseverar que a lo largo de toda la región no habrá variación alguna es inadecuado; por lo que se realizó un mallado del municipio de Mexicali con una separación entre puntos de 10 km, figura III.4. Por otra parte, se consideró una malla más cerrada para la zona urbana del municipio en cuestión, con una separación de 2 km, figura III.5. Es importante señalar que en cada intersección de la malla se obtendrá un EPU, con

esta información se realizará una base de datos, y con ella se podrá interpolar en puntos intermedios, y así se obtendrán parámetros sísmicos nuevos.

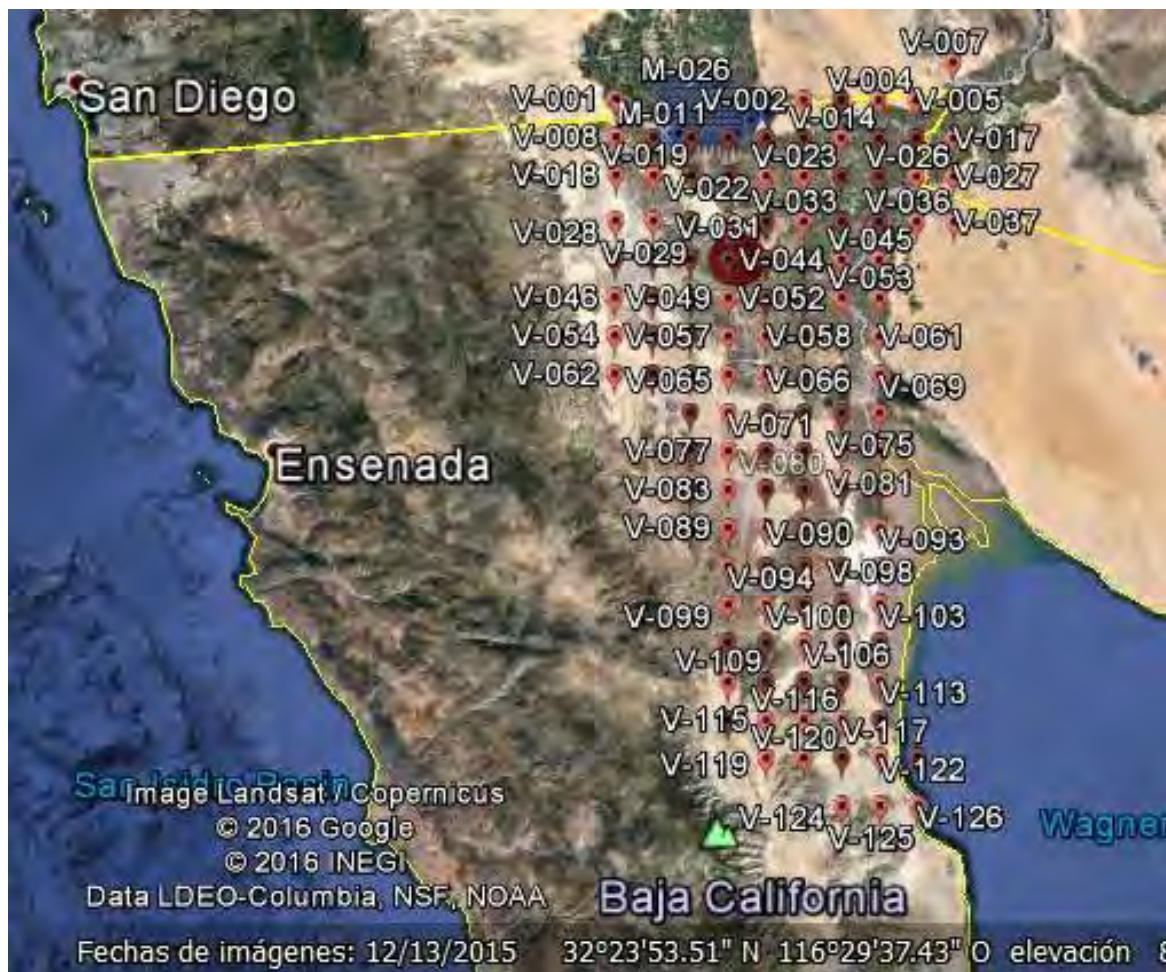


Figura III.4 Ubicación de EPU en el Municipio de Mexicali.

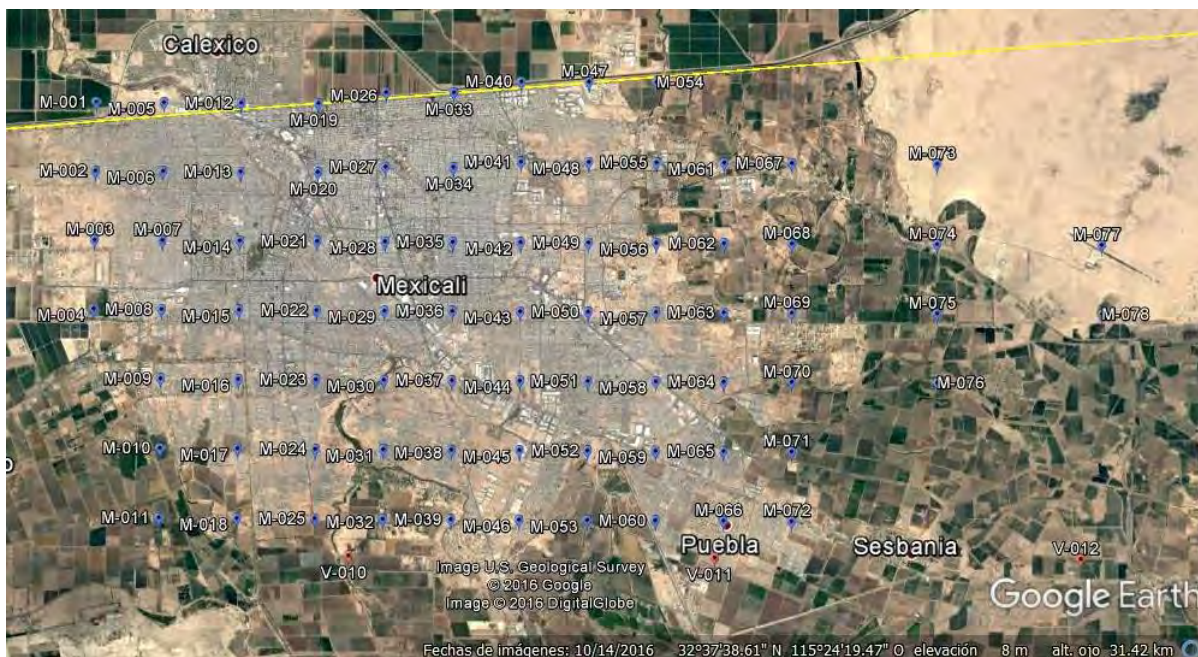


Figura III.5 Ubicación de EPU's en la ciudad de Mexicali.

Para lograr la interpolación de los EPU's, se utilizó el Método de Ponderación de Distancia Inversa (IDW, por sus siglas en inglés), (Sheppard, 1968), que es una de las técnicas mayormente utilizadas para la interpolación de parámetros, tanto por su facilidad como por su confiabilidad en los resultados. El método está basado en considerar que la superficie de interpolación debe estar influenciada, en mayor proporción, por los puntos conocidos más cercanos e influyen menos aquellos puntos más distantes. La superficie de interpolación es una media ponderada entre los puntos conocidos y el peso asignado a cada punto; este peso disminuye a medida que la distancia de interpolación conocida aumenta (Inca, 2013 y Juárez y otros, 2013).

Capítulo 4 Espectros de peligro uniforme

4.1 JUSTIFICACION DE ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME EN MEXICALI

Considerar un valor único de aceleración espectral para todo Mexicali es poco recomendable, ya que podrían ocurrir dos escenarios sísmicos. En términos generales, y a manera de ejemplo: el primero, que el evento sísmico tenga parámetros sísmicos menores que las demandas sísmicas de la reglamentación vigente; el segundo escenario, en el que la reglamentación se encuentre rebasada por las sollicitaciones sísmicas del evento ocurrido.

En este trabajo se obtuvieron demandas sísmicas mayores a las propuestas en las NTC-BC-12, por lo cual, los espectros de peligro uniforme (EPU) son comparados contra espectros de respuesta obtenidos mediante los registros del sismo de magnitud 7.2Mw que se presentó el 4 de abril de 2010, de igual manera son comparados con el programa PRODISIS V4.1 y espectros deterministas obtenidos con el programa EZ-Frisk 7.65. Para llevar a cabo esta demostración se seleccionaron cinco estaciones acelerométricas dentro de la zona de estudio que a su vez hubiesen registrado el evento de 2010 y a las cuales se tuvo acceso a sus registros, las estaciones seleccionadas son las siguientes (Figura IV.1):

- Estación de registro ubicado en la estación de bomberos del poblado de Calexico, California.
- Estación de registro #5054 de la USGS.
- Registro ubicado en el edificio del poder ejecutivo del estado de Baja California.
- Estación de registro ubicada en el ejido Tamaulipas.
- Estación ubicada en la planta geotérmica.



Figura IV.1 Ubicación de estaciones de registro en el municipio de Mexicali, Baja California, respecto al epicentro del sismo del 4 de abril de 2010.

Se eligieron las estaciones presentadas en la figura IV.1, ya que se encontraban en funcionamiento cuando se presentó el terremoto de abril 2010. Se seleccionó este evento sísmico por que las características de este corresponden con las consideradas para el cálculo de un EPU con un periodo de retorno de 474.6 años, por lo que son comparables los espectros de respuesta de los registros acelerométricos del evento con el estudio de peligro sísmico efectuado en esta investigación, sirviendo de valor paramétrico para evaluar la magnitud de los valores obtenidos mediante el estudio de peligro sísmico. Los EPU fueron obtenidos por medio del programa EZ-Frisk utilizando el enfoque probabilista de Kramer para un periodo de retorno de 474.6 años.

En las figuras IV.2 a la IV.6 se presentan el espectro de respuesta del 4 de abril de 2010, el espectro propuesto por PRODISIS V4.1 para un periodo de 474.6 años y los espectros probabilista y determinista obtenidos con el programa EZ-Frisk para un periodo de retorno de 474.6 años los cuatro valores corresponden al mismo sitio en el cual se encontraba el

equipo de medición, para las estaciones de Gobierno del Estado, Estación de Bomberos del poblado de Calxico, Cruce Fronterizo Oriente, Planta Geotérmica y Ejido Tamaulipas respectivamente.

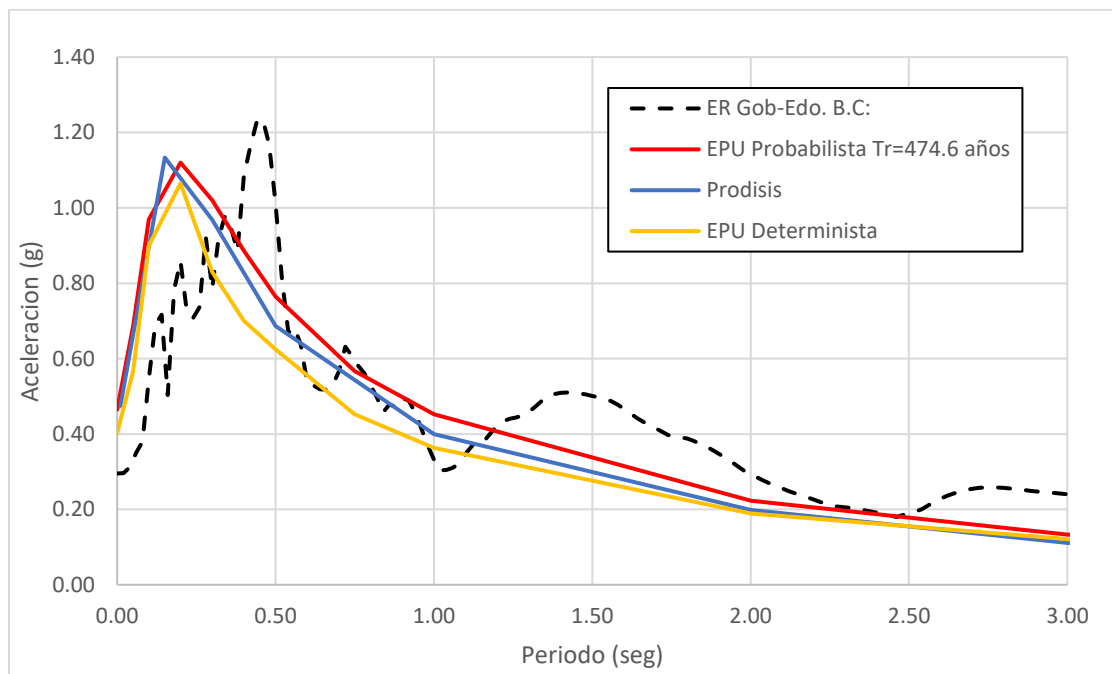


Figura IV.2 Espectros calculados vs Espectro de Respuesta en el edificio del ejecutivo de Baja California.

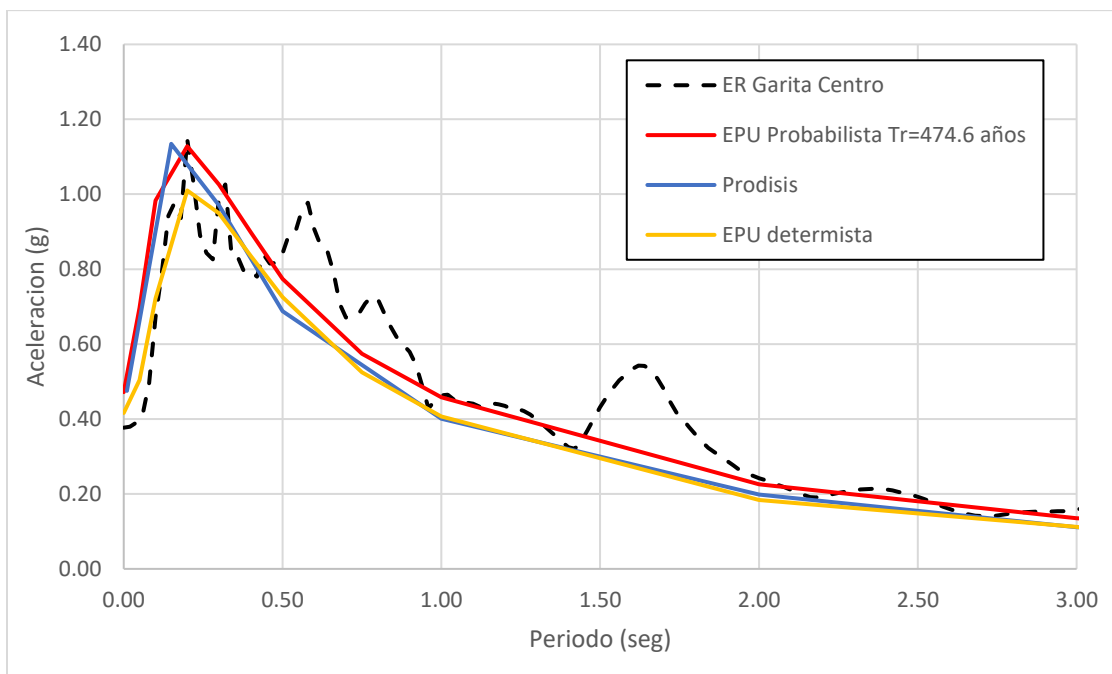


Figura IV.3 Espectros calculados vs Espectro de Respuesta en Garita Centro.

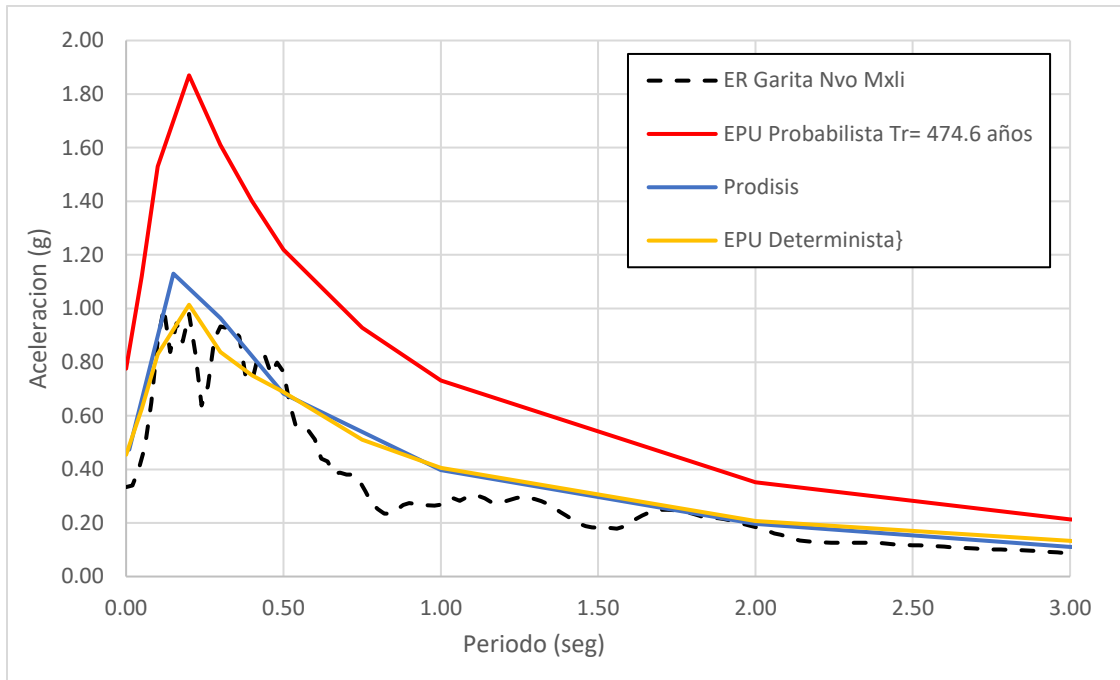


Figura IV.4 Espectros calculados vs Espectro de Respuesta en Garita Oriente

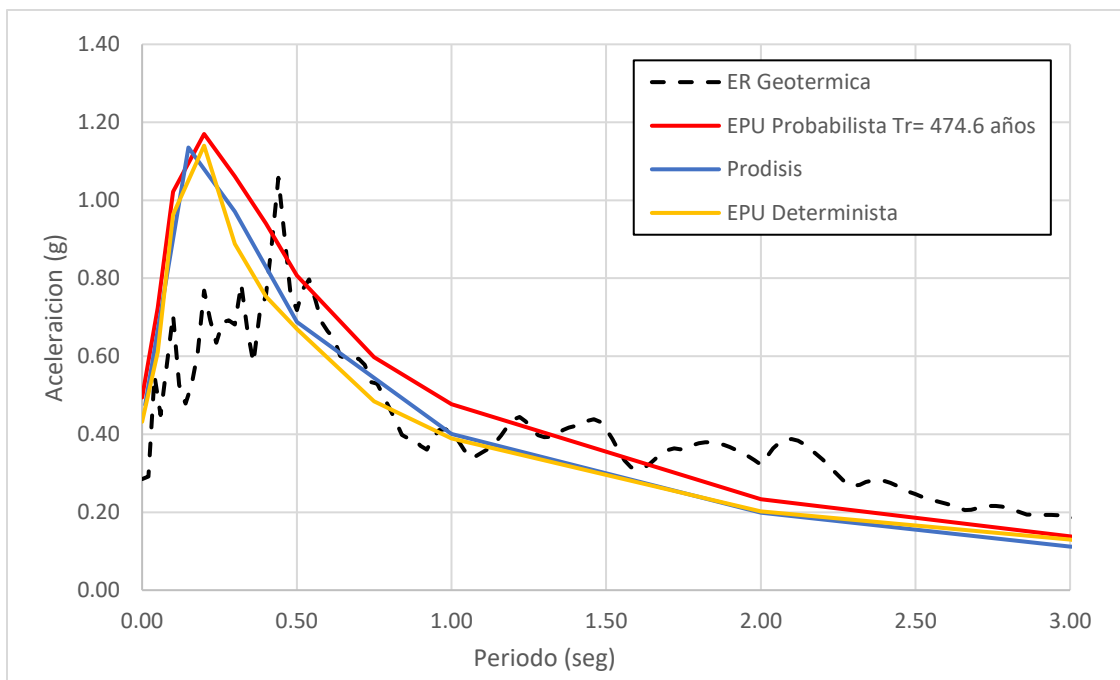


Figura IV.5 Espectros calculados vs Espectro de Respuesta en Planta Geotérmica Cerro Prieto.

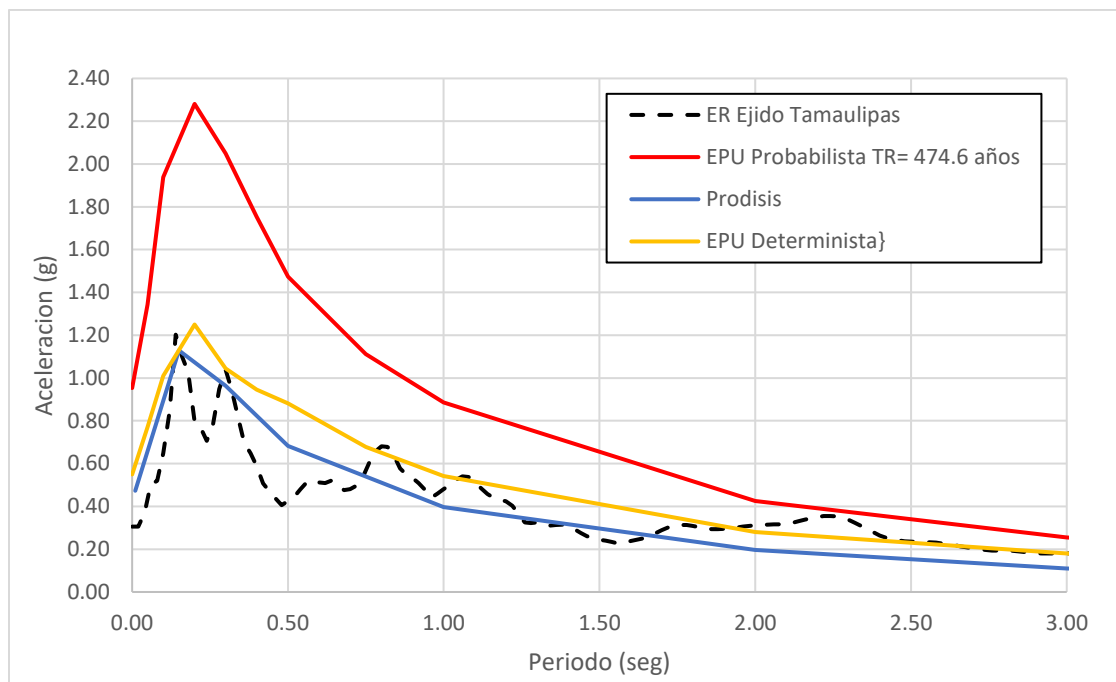


Figura IV.6 Espectros calculados vs Espectro de Respuesta en Ejido Tamaulipas.

Los espectros presentados en las figuras anteriores son espectros elásticos para terreno firme, es posible apreciar que los espectros probabilista y determinista de EZ-Frisk presentan un gran parecido con el espectro de PRODISIS y el espectro de respuesta en los sitios del poder ejecutivo del estado de Baja California, estación de bomberos de Calexico, California, y en la planta geotérmica de Mexicali, mientras que en el caso de la estación #5054 de la USGS y en la estación del ejido Tamaulipas los valores estimados por el espectro probabilista son casi del doble de la magnitud, esto se debe a que prodisis presenta una metodología determinista y estima como parámetro máximo las aceleraciones máximas registradas, mientras que nuestro estudio estima el potencial máximo de cada falla que en el caso investigado sería un sismo de magnitud 7.9 Mw (figura III.1) presentado en la falla BC2 (Falla de san Andrés) la cual se sitúa casi por debajo de estas dos estaciones.

Para fines prácticos de este trabajo, los resultados obtenidos en estos puntos de comparación nos brindan la confianza para considerar que los valores del estudio de peligro sísmico pueden considerarse como apropiados y cercanos a la realidad para terreno firme en Mexicali. Por lo tanto, se pueden utilizar los EPU con periodo de retorno de 474.6 años como espectros de diseño sísmico elásticos.

4.2 Espectro en terreno firme para Mexicali

Dentro de la ciudad de Mexicali se obtuvieron 78 espectros de peligro uniforme (EPU). A continuación, se presentan 12 de los 78 EPU obtenidos en la ciudad de Mexicali para un periodo de 474.6 años (figura IV.7).

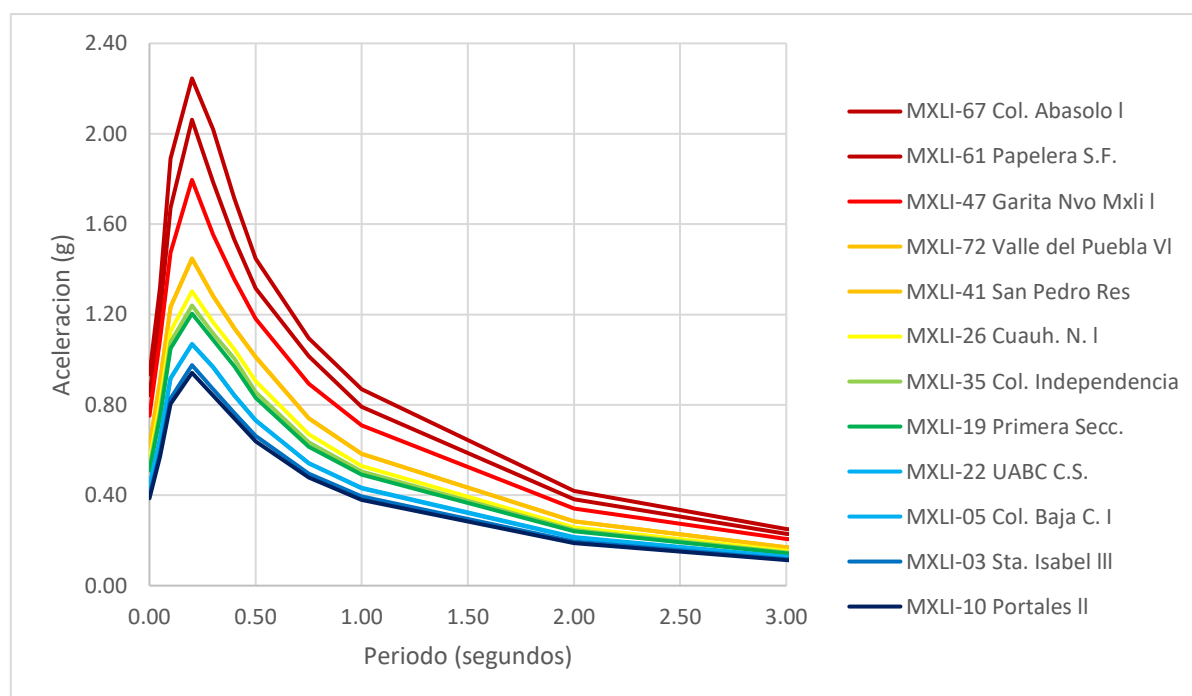


Figura IV.7 Espectros de peligro uniforme en la ciudad de Mexicali para un $T_r = 474.6$ años.

En la figura IV.7 se observa que los periodos entre 0.10 – 0.30 segundos presentan aceleraciones que oscilan entre 1.0g a 2.30g, lo que representaría un peligro para la infraestructura típica regional que se caracteriza por ser infraestructura de block de concreto, catalogada como estructura rígida con periodos cortos que se encuentran entre 0.10 a los 0.20 segundos la cual podría entrar en resonancia en caso de un evento sísmico y presentar un daño mayor al esperado en el diseño de la misma. Para observar de mejor manera las diferencias del espectro de reglamento a los espectros obtenidos en la investigación volvemos a presentar los espectros de la figura IV.7 adicionando el espectro de diseño presente en las NTC-BC de 2012, sin embargo hay que recordar que los espectros que obtenemos con el programa EZ-Frisk son espectros elásticos, por lo cual, los valores del espectro de las NTC-BC fueron multiplicados por 2 que es el valor de sobre resistencia que presenta esta norma, con lo cual obtenemos el espectro elástico de la norma y el cual compararemos con los espectros de peligro uniforme (EPU) obtenidos, buscando presentar de manera gráfica las diferencias entre la norma y esta investigación (figura IV.8).

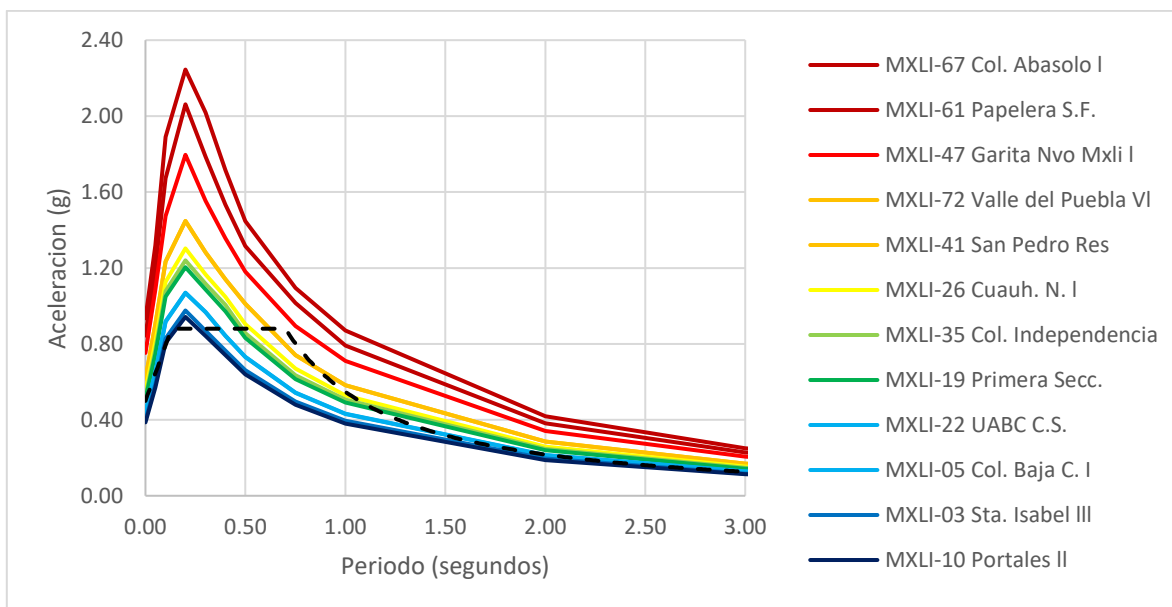


Figura IV.8 Espectros de peligro uniforme en la ciudad de Mexicali para un $T_r = 474.6$ años Vs Espectro de diseño sísmico de las NTC2012 (Elástico) de Baja California.

Como se muestra en la figura IV.8 todos los EPU calculados para la ciudad de Mexicali sobrepasaron la aceleración que se predice en las NTC-BC 2012, observando que 21 de los 78 EPU calculados presentan una variación menor al 20% respecto al valor estimado por la norma.

En la zona rural del municipio de Mexicali, en la localidad conocida como el Valle de Mexicali, se obtuvieron los Espectros de Peligro Uniforme a una distancia de 10km entre ellos para un total de 126 registros. Observando los del estudio de peligro sísmico se logra apreciar que los valores máximos de aceleración varían entre 2.2g a 0.4g para esta zona de estudio (Figura IV.9) y que solo el 20% de los registros obtenidos para el valle de Mexicali sobre paso la aceleración estimada en la norma.

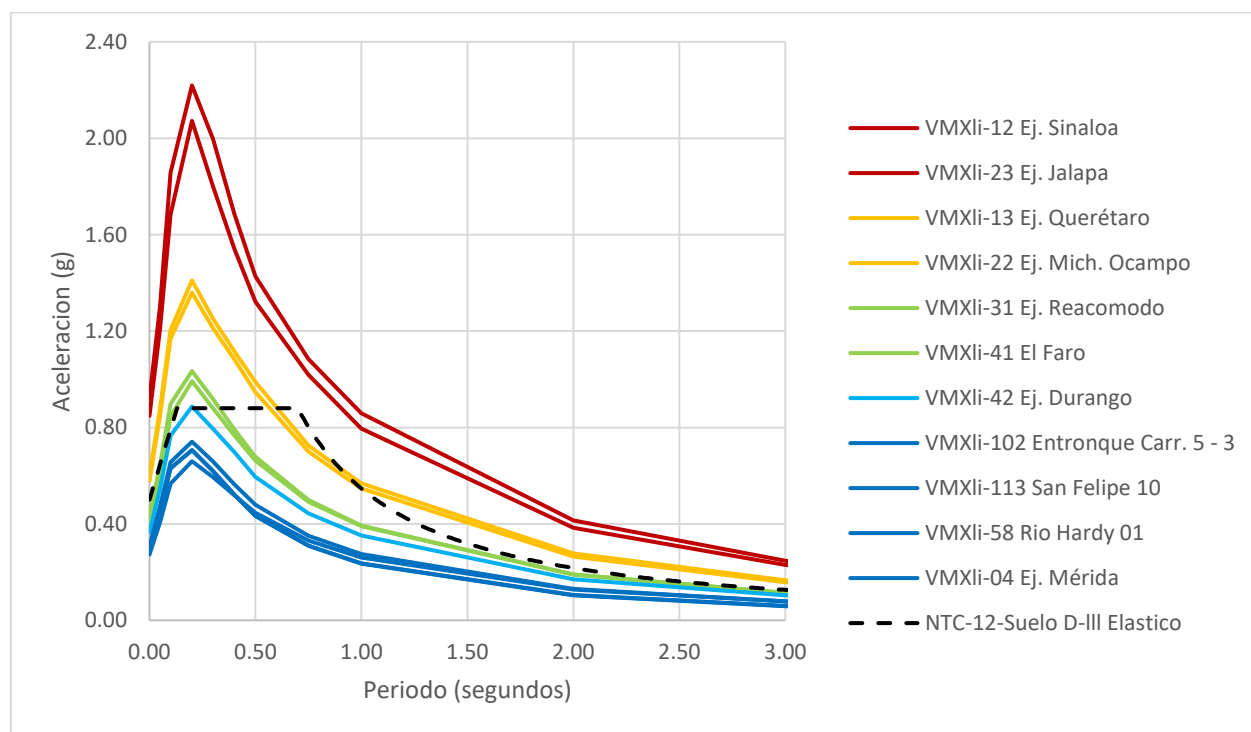


Figura IV.9 Espectros de Peligro Uniforme en el Valle de Mexicali para un $T_r = 474.6$ años Vs Espectro de diseño sísmico de las NTC2012 de Baja California.

Las figuras anteriores presentan de manera visual las variaciones de aceleración a las cuales puede ser sujeto el suelo del municipio de Mexicali, ya que éstas pueden presentar variaciones de 2g entre un punto y otro, por lo que es importante remarcar que considerar un valor único de aceleración espectral para el municipio es inadecuado; debido a la extensión municipal, la ubicación de las fallas activas y que la distancia a estas es variable; por lo que existen zonas dentro del municipio donde el potencial sísmico es mayor en comparación a los puntos más alejados a las fallas.

4.3 Efectos de sitio

Si el sitio de interés no se encuentra sobre roca dura (terreno firme), ese movimiento de referencia se verá afectado por la amplificación generada por las irregularidades geológicas, la presencia de capas de suelo, y la geometría irregular de las interfases entre medios con distintas propiedades. Es esa amplificación del movimiento sísmico lo que conocemos como efectos de sitio, los cuales modifican la predicción del movimiento del terreno para un sismo dado con respecto al movimiento en roca dura a la misma distancia a la fuente (Chavez-Garcia, 2014). En el caso de Mexicali se identificaron dos efectos de sitio los cuales no tomamos en consideración en esta investigación pero que sería importante desarrollar en trabajos futuros, la primera son los efectos de licuación que se presentaron principalmente en la zona del valle de Mexicali y el efecto de la aceleración vertical del terreno en las estructuras. En relación al segundo efecto mencionado (aceleración vertical) es importante señalar que durante el evento de 2010 existieron zonas del valle de Mexicali que presentaron aceleración verticales mayores a 3g (Figura IV.10 y IV.11) lo que generó daños severos en la infraestructura rural generando que ciertas poblaciones fueran reubicadas en nuevas zonas.

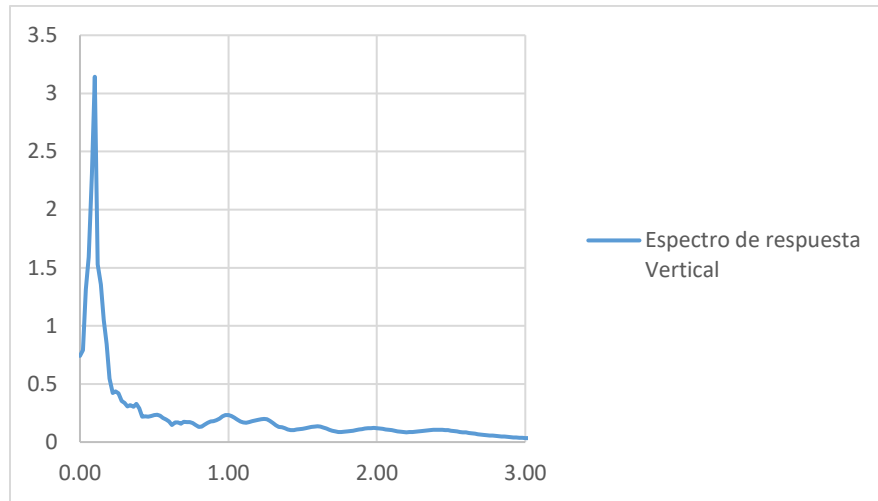


Figura IV.10 Espectro de Respuesta Vertical cercano al ejido Zacamoto.



a) Canal de riego



b) Carretera local del valle de Mexicali



c) Casa habitación Valle de Mexicali



d) Fisura de terreno en poblado la ventana

Figura IV.11 Daños presentados en el valle de Mexicali por sismo de abril de 2010 (Colegio de ingenieros civiles de Mexicali).

Con lo presentado en este capítulo, se ha logrado observar que Mexicali presenta diversas solicitudes de aceleración horizontal a lo largo del municipio, por lo que considerar la implementación de espectros de sitio, a partir de los EPU's obtenidos en este trabajo, es una opción viable y eficaz en lugar de considerar un valor único para diseño sísmico. Esta medida podría ser beneficiosa para el municipio, ya que se podría conocer de mejor manera las demandas a las que podrá someterse la estructura en caso de presentarse un evento sísmico severo y reducir la cantidad de daño en la estructura aunado a la mitigación en el número de posibles pérdidas humanas.

Capítulo 5 Respuesta sísmica de estructuras

5.1 Estructuras típicas en Mexicali, Baja California

Mexicali fue fundada hace 114 años, por lo tanto el catálogo de infraestructura urbana abarca edificios viejos hasta edificios contemporáneos; así podemos definir 3 tipos de construcciones en la ciudad:

1. Aquellas estructuras que fueron elaboradas cuando la entidad carecía de una reglamentación local (1966), por lo que se puede decir que son aquellas ubicadas en las zonas más tradicionales de Mexicali y su valle. La mayoría de estas edificaciones fue elaboradas con adobe, ladrillo y concreto (Figura V.1).



a) Centro histórico de Mexicali



b) Casa de la cultura



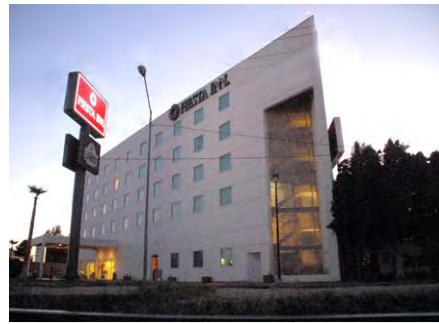
c) Rectoría de la Universidad Autónoma de Baja California

Figura V.1 Edificios Tipo 1 elaborados antes de que existiera la reglamentación local.

2. Estructuras de mampostería reforzada internamente (block de concreto), este tipo de infraestructura es el que se presenta en mayor medida en la ciudad de Mexicali, ya que fue un método de construcción fácil y rápida. Bajo este método de construcción es posible encontrar casa habitación, edificios comerciales, edificios habitacionales y naves industriales (Figura V.2).



a) Casa habitación



b) Fiesta Inn Mexicali



c) Fraccionamientos residenciales

Figura V.2 Edificios elaborados con Block de concreto.

3. Estructuras de acero, al ser una ciudad industrial Mexicali cuenta con una gran cantidad de parques industriales los cuales son compuestos principalmente por estructuras tipo galerón, elaboradas de acero estructural en su mayoría. De igual manera se ha visto el implemento de ampliaciones de acero en la vivienda habitacional en la ciudad (Figura V.3).



a) Nave industrial de marcos de acero y muro tilt up



b) Nave industrial de marcos de acero y muro de lamina

Figura V.3 Edificios de Acero.

5.2 Estructuras susceptibles a daño.

El estudio de peligro sísmico elaborado en este trabajo mostró un pico de aceleración alrededor de 0.20 segundos, lo que resulta adecuado para un lugar cercano a las fallas activas y que presenta suelo firme en la mayor parte de su territorio. De igual manera es importante mencionar que las estructuras típicas de mampostería, adobe y concreto son más susceptibles a recibir daño en caso de que se presente un evento sísmico ya que los periodos de estas estructuras por lo regular son bajos cercanos al periodo del suelo de 0.20 segundos, lo que haría entrar en resonancia dichas estructuras, creando la posibilidad de

que éstas presenten un incremento de carga mayor al que son capaces de soportar, generando un tipo de daño irreparable en el inmueble al punto de colapso. (Figura V.5).



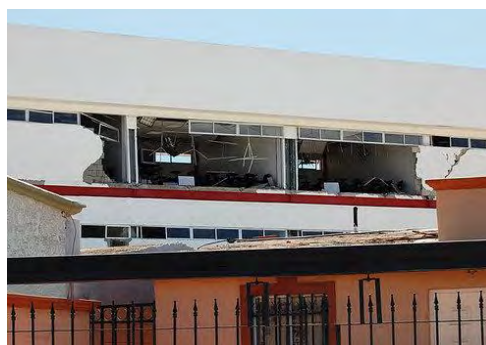
a) Vivienda de block de concreto



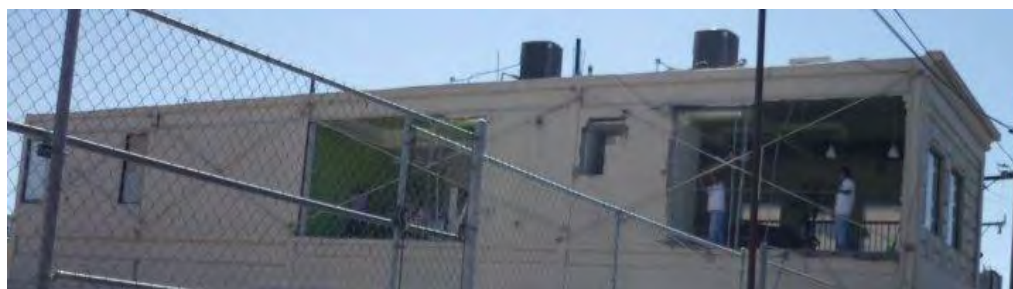
b) Vivienda de adobe



c) Vivienda de estructura ligera



d) UVM Mexicali



d) Locales Comerciales, con muro tapon de block de concreto

Figura V.4 Daños presentados en Mexicali, por el sismo de abril de 2010.

Otro punto de vulnerabilidad que fue posible observar en este trabajo se debió a la información de los EPU's que se obtuvieron, una vez que se compararon éstos con el espectro de diseño del capítulo sísmico se visualizó una discrepancia, en la cual el

reglamento actual subestima las aceleraciones posibles que pueden actuar en la zona oriente de la ciudad. Algo alarmante ya que en los últimos años el crecimiento de la ciudad se ha focalizado en esta región, por lo tanto si esta zona se va a seguir usando para desarrollo de vivienda es importante realizar un código sísmico que sea más exigente en la zona oriente de Mexicali, ya que de acuerdo al estudio de peligro sísmico que se elaboró dicha zona de la ciudad presenta aceleraciones cercanas a un 200% de la aceleración elástica prevista en el reglamento.

5.3 Modelo matemático comparativo

A continuación, se presentan las variaciones de las demandas sísmicas de una estructura situada en distintas ubicaciones dentro de la malla trazada en el estudio de peligro sísmico. Como primera instancia fue necesario seleccionar un modelo representativo de una estructura del Tipo “B”; retomando lo descrito en el capítulo dos en el cual se cita que la norma del estado de Baja California considera una estructura tipo B como: “Aquella estructura cuya falla ocasionaría pérdidas de magnitud intermedia, tales como plantas industriales, bodegas ordinarias, comercios, bancos, restaurantes, casa habitación, edificios de apartamentos y oficinas, bardas cuya altura exceda de 1.80 m y todas aquellas estructuras cuyas fallas por movimiento sísmico pueda poner en peligro otras construcciones de este grupo”.

Se eligió el edificio del “Poder ejecutivo del gobierno del estado de Baja California” (PEBC) (Figura V.6), como modelo comparativo, ya que cumple con las características de un edificio de oficinas de mediana altura de concreto reforzado. Una de las razones para elegirlo es que se contaba con los planos de construcción y que se encontraba instrumentado durante el evento sísmico de abril de 2010, con dos sismógrafos uno ubicado en el sótano del edificio y otro en la azotea del mismo (figura V.7).



Figura V.5 Fotografías del edificio del Ejecutivo del Estado de Baja California. (Martínez, 2011)

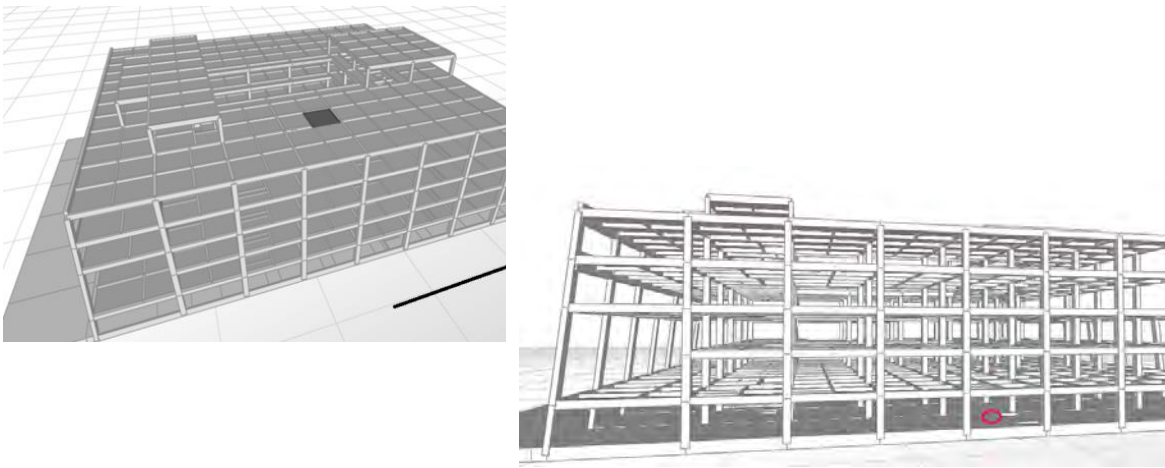


Figura V.6. Ubicación de sismógrafo en la cubierta, y en el sótano, respectivamente (Martínez, 2011)

5.3.1 Consideraciones para el Análisis

El modelo fue elaborado con base en los planos originales del edificio, los cuales indican dimensiones de columnas, trabes y losas, para cada nivel. El edificio cuenta con muros interiores no estructurales que no están conectados a la estructura, por lo que estos elementos no se incluyeron en el modelo. Una vez realizado el modelo matemático del edificio se procedió a su calibración matemática, para ello se utilizaron los registros que el sismógrafo registro en 2010. El registro de la base se utilizó como la excitación sísmica y el

de la azotea del edificio se utilizó para comparar los espectros de piso que presentaba el modelo matemático con el espectro de piso del registro real.

Debido a que el inmueble tiene cerca de 40 años, y ha estado presente en sismos de magnitud considerable, tales como el sismo de 6.6Mw de 1979, el de 6.6Mw de 1987, 5.9Mw de 2009, se procedió en una primera instancia considerar una inercia del 70% en las columnas y de un 35% en las trabes correspondiente al posible daño que han acumulado estos elementos a lo largo del tiempo. Una vez que se compararon el espectro de piso del modelo matemático en la azotea con el espectro de respuesta de la señal (Figura V.8 y V.9), se logró observar que considerar daño estructural en los elementos estructurales hacia la estructura más flexible y la alejaba el periodo fundamental del modelo matemático del periodo real; por lo que no se consideró daño en los elementos y se tomó en cuenta el 100% de la inercia de los elementos estructurales, lo que llevó a una coincidencia de los periodos de la estructura en las dos direcciones de análisis.

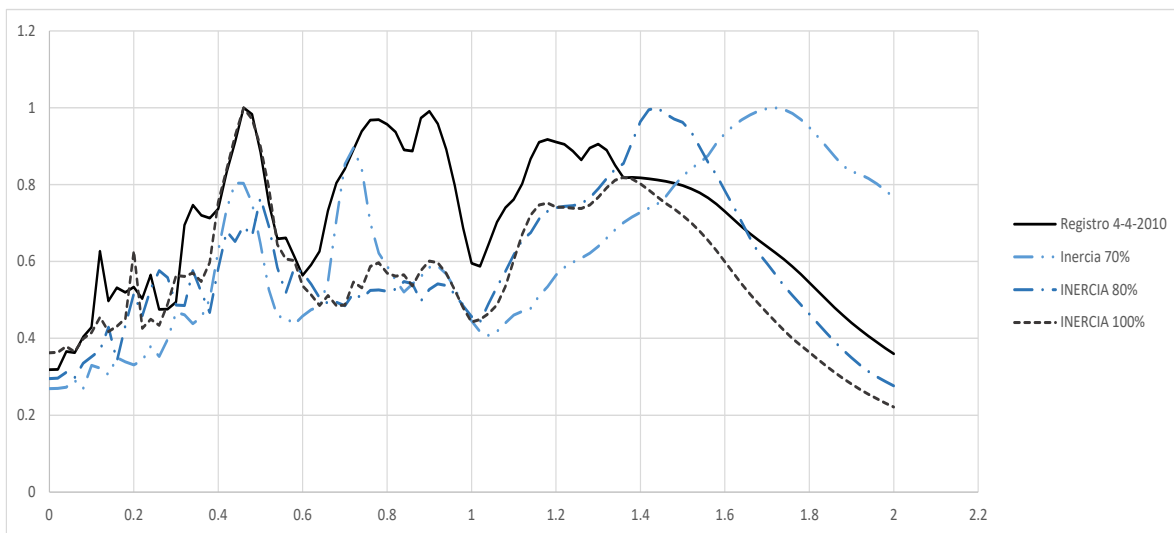


Figura V.7 Espectros de piso dirección E-O del Edificio del PEBC.

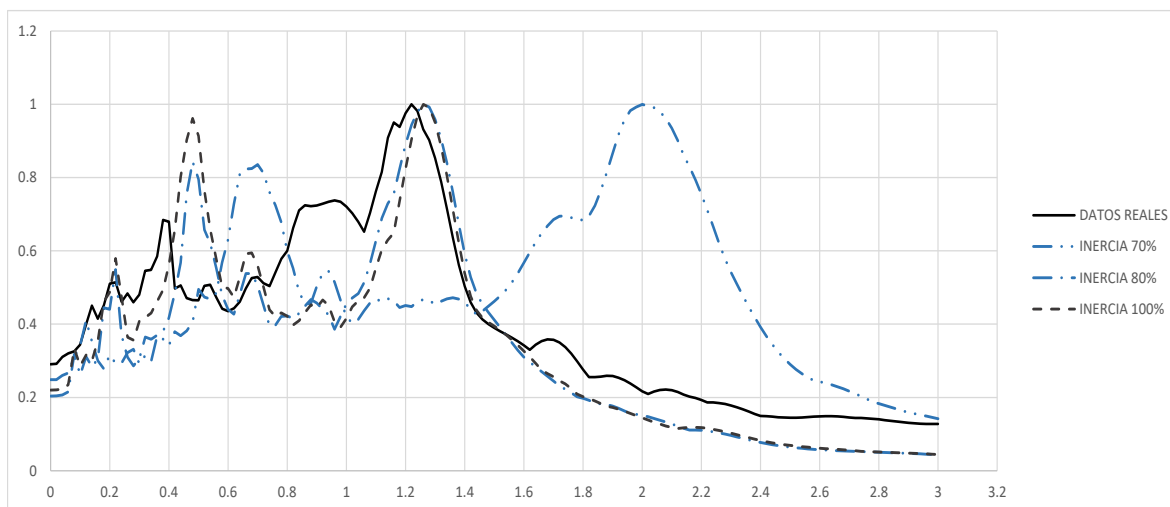


Figura V.8 Espectros de piso dirección N-S del Edificio del PEBC.

5.3.2 Estructuración y Propiedades del Modelo Matemático.

El edificio está estructurado con base en marcos rígidos (marcos portal), formados por columnas y trabes de concreto. Para los entrepisos se cuenta con una losa plana que esta soportadas por vigas de concreto secundarias que dividen las bahías en dos. En general el tamaño de las columnas es de 750mm x 750mm, las trabes principales de 350mmx750mm, y las vigas secundarias de 250mm x 750mm.

A continuación, se describen las consideraciones generales en la creación del modelo tridimensional del edificio.

- Carga muerta = 2.94 kPa (300 kg/m²)
- Carga viva = 2.45 kPa (250 kg/m²)
- Carga viva por sismo = 17.65 MPa (180 kg/m²)
- Resistencia del concreto, f'_c = 20 MPa (200kg/cm²)

El edificio presenta un periodo superior a 1.2 segundos, lo que es 3 o 4 veces mayor a los periodos dominantes de la ciudad, para fines de este documento se analizó el comportamiento del edificio, bajo la suposición de que este se cuente con muros cortante

en las esquinas exteriores (Figura V.10), generando un edificio más rígido. Los muros tienen un espesor de 350 mm y se utilizó un concreto de resistencia $f'_c = 27.45\text{MPa}$ (280 kg/cm^2). Este edificio tiene periodos de 0.46seg, 0.46seg, y 0.31seg.



Figura V.9 Vista del modelo tridimensional del edificio del PEBC con muros de cortante.

5.3.3 Revisión de Perfiles de cortante del modelo Comparativo

Una vez elaborado y rigidizado el modelo se procedió a realizar una comparativa de cortantes basales a los que estaría sometida la estructura, si esta se ubicaba en distintos puntos del municipio. Para el cálculo de los cortantes, se utilizó la base de datos de EPU's obtenidos en este trabajo, y como punto de partida se utilizó el espectro elástico del reglamento de Baja California por lo que un valor igual al 100% significa que el EPU presenta la misma aceleración que el espectro elástico de las NTC, las variaciones de cortante que se obtuvieron en este trabajo iban desde un 48% a un 300% (Figura V.11).

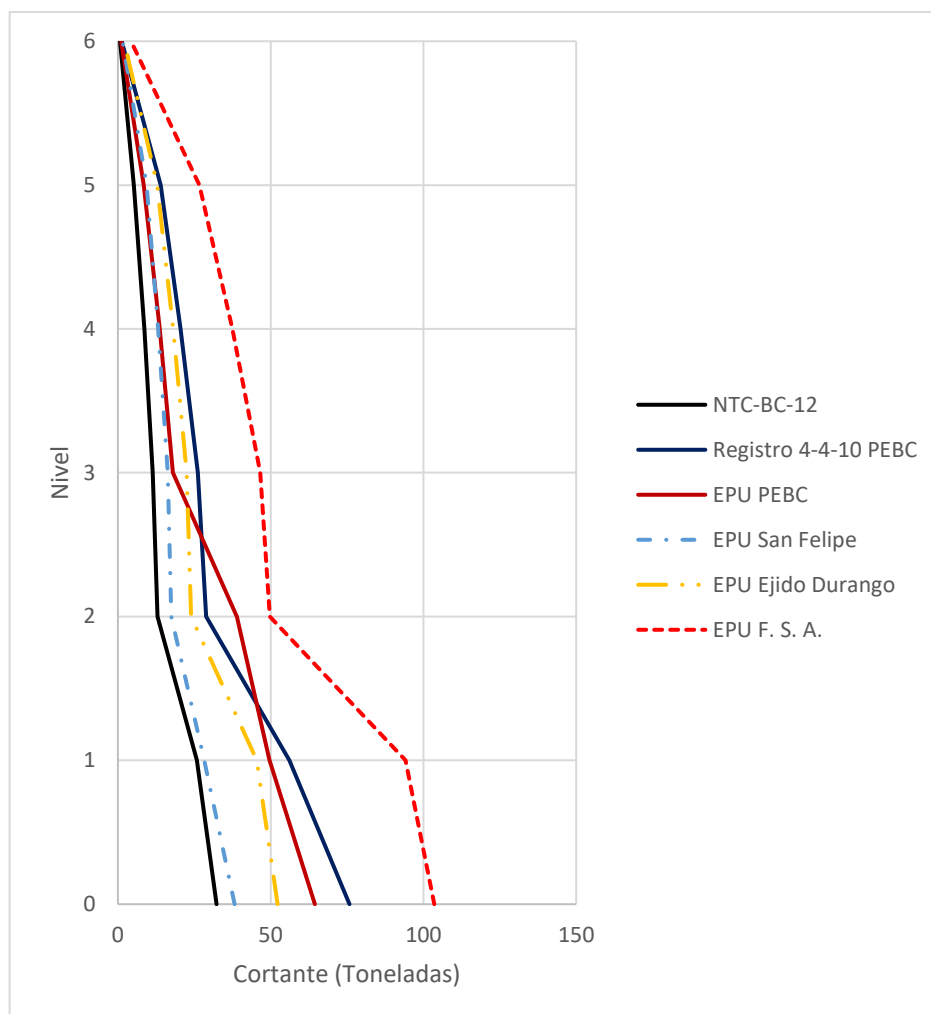


Figura V.10 Perfil de cortantes del edificio del PEBC, bajo diferentes escenarios sísmicos dependiendo de la ubicación del edificio dentro del municipio de Mexicali.

En la figura V.11 se presentan los perfiles de cortante a los que es sometido la estructura del PEBC, si ésta estuviera ubicada en 3 zonas del municipio de Mexicali, que fueron el poblado de San Felipe, El ejido Durango y la carretera al Aeropuerto de Mexicali en su intersección sobre la falla de san Andrés. Es importante resaltar que los cortantes estimados se encontraron por encima de los previstos por las NTC. Lo que indica que las estructuras del tipo B cercanas al periodo fundamental del suelo en terreno firme podrían presentar problemas por cortante.

5.3.4 Variación en las cuantías de acero bajo diversos escenarios sísmicos

Una de las principales inquietudes derivadas de esta investigación es el encarecimiento de las construcciones del tipo B en Mexicali ya que los parámetros sísmicos obtenidos en la zona urbana son superiores a los presentes en la normativa actual del municipio, es debido a esto que nos dimos a la tarea de revisar las cuantías de acero que solicita el modelo matemático bajo los diversos escenarios sísmicos indicados en la figura V.11 y los cuales se presentan en la figura V.12.

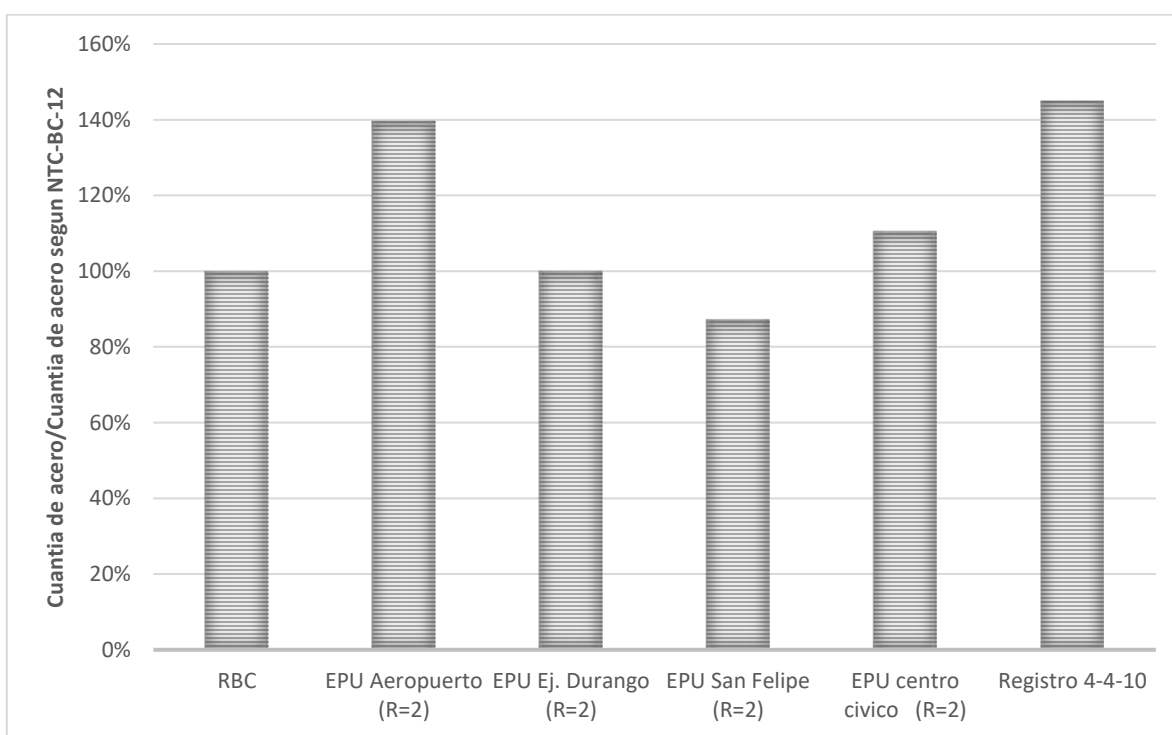


Figura V.11 Variación de las cuantías de acero en porcentaje, bajo diversos escenarios sísmicos.

En la figura V.12 se aprecia como las cuantías de acero que solicitan las columnas del modelo matemático no varían en la misma proporción que varía el cortante de la figura V.11, ya que la cuantía de acero varía únicamente en un 40% respecto al acero solicitado por la norma.

Capítulo 6 Conclusiones

6.1 Contribuciones y Conclusiones generales

Se ha estudiado el potencial sísmico de Mexicali B.C. en términos de peligro sísmico por medio de EPU's con un periodo de retorno de 474.6 años, los cuales son comparables y podrían sustituir a los Espectros de Diseño de la normatividad vigente en el municipio. Los EPU's obtenidos por medio del programa EZ-Frisk fueron localizados a cada 10 km de distancia uno de otro, con lo que obtenemos una malla a lo largo de todo el municipio, y por medio de una interpolación lineal es posible obtener un EPU de un sitio determinado el cual podría funcionar como un espectro de sitio, ya que el programa calcula espectros de peligro para suelo firme, que en caso de Mexicali, el estrato superficial de terreno se considera de este tipo.

Según el programa de computo EZ-Frisk, el periodo fundamental del suelo en el municipio de Mexicali ronda los 0.20 segundos, lo cual puede ser soportado por medio del estudio de microzonificación hecho por CICESE en 2007, que indica que los periodos de suelo en la ciudad de Mexicali se encuentran entre 0.10 segundos y 0.60 segundos.

Gracias a la malla elaborada se visualizaron zonas en las cuales el espectro elástico del reglamento del municipio de Mexicali cubre de manera satisfactoria las demandas de aceleración posible de acuerdo a la información obtenida de los EPU's. También, fue posible observar una zona en la cual el reglamento presenta aceleraciones por debajo de las estimadas en los EPU's; los valores de excedencia presentan una variación con el valor máximo esperado por la norma del orden de un 10% a un 175%. Por lo tanto, esta zona en

la cual los EPUs presentan aceleración de mayor índole, se pueden considerar altamente vulnerables en caso de que se presente un evento de magnitud considerable. Dentro de la zona urbana de Mexicali, la zona de mayor peligro se encuentra ubicada al oriente de la ciudad que son las zonas de crecimiento residencial de las últimas décadas y que se encuentran más próximas a la Falla BC2 (Falla de San Andrés). La zonificación sísmica presentada, propone el uso de varios valores de aceleración máxima de acuerdo a la ubicación del sitio de trabajo, por lo que sí es comparado con la norma actual esta zonificación puede presentar valores de aceleración muy por encima o por debajo.

La aceleración vertical originada por un evento sísmico típicamente es despreciable en el cálculo de la fuerza sísmica que actúa en una estructura, pero en el caso de Mexicali hay zonas en las cuales las aceleraciones verticales son un 400% mayor a la aceleración horizontal prevista en el mismo sitio, esto se pudo apreciar por medio de los registros que se tienen del evento de 2010. Por esto, es importante ubicar las zonas donde la aceleración vertical es de gran importancia, como por ejemplo la zona ubicada de acuerdo a los registros al sur del área de falla conocida como Cerro Prieto. Ejemplo de este efecto se presentó en el poblado Zacamato, el cual termino prácticamente destruido después del evento de abril de 2010, y donde la aceleración vertical alcanzo un pico de aceleración cercano a 3.2g, en comparación a la aceleración horizontal que alcanzó una aceleración máxima de 0.8g. Aunque en este trabajo no se estudiaron sus efectos en las estructuras es importante dejar presente para trabajos futuros, que hay zonas dentro de Mexicali, en el cual la componente vertical por sismo es de mayor importancia que la horizontal.

Mexicali presenta una infraestructura de baja altura, la cual, de acuerdo a sus capacidades dinámicas, puede entrar con mayor frecuencia en resonancia con las aceleraciones típicas de los eventos sísmicos de la región. Entonces, este trabajo busca sentar las bases para cambiar el paradigma de la ciudad, la cual se resiste al crecimiento vertical. Debido a las características dinámicas de la ciudad y su cercanía a las fallas, el periodo típico del suelo,

como ya se mencionó de alrededor de 0.20 segundos y edificios de mediana altura presentan por lo regular periodos cercanos a 1 segundo generando que las demandas por sismo al momento de un diseño sean mucho menores.

6.2 Expectativas de investigación

Derivados de esta investigación se presentaron posibles trabajos futuros con la finalidad de nutrir la información obtenida en este trabajo, a continuación, se presentan posibles líneas de investigación:

- a. Vulnerabilidad estructural de Mexicali, Baja California.
- b. Extensión del estudio de peligro sísmico a toda la península de Baja California.
- c. Análisis de los efectos de licuación, en las estructuras del valle de Mexicali.
- d. Efectos de la componente vertical de un sismo en las estructuras del valle de Mexicali.

Capítulo 7 Bibliografía

Abrahamson, N. A., W. J. Silva (2008), Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion Relations, *Earthquake Spectra*, 24(1), 67-97.

Boore, D. M., G. M. Atkinson (2008), Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at spectral periods between 0.01s and 10.0s, *Earthquake Spectra*, 24(1), 99-138.

Boore D., Joyner W., Fumal T., (1997) "Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes",

Bormann, P., Aki, K., Lee, W. H., (2003). Appendix 1 glossary of interest to earthquake and engineering seismologists. En *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, vol. 81, Part B de *International Geophysics*, páginas 1793 – 1856. Academic Press.

Campbell-Bozorgnia (2007) "NGA Ground Motion Relations for the Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters".

Campbell, K. W., Y. Bozorgnia (2008), NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10s, *Earthquake Spectra*, 24(1), 139-171.

CFE, (2008). Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad. Diseño por Sismo, Instituto de Investigaciones Eléctricas de la CFE.

Chiou, B. S.-J., Youngs R. R. (2008), An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra, *Earthquake Spectra*, 24(1), 173-215.

Cornell, C. A., (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 58(5), páginas 1583–1606.

Cruz-Castillo M. (2002), “Catalogo de las Fallas Regionales Activas en el Norte de Baja California, México”, GEOS, Unión Geofísica Mexicana AC. Abril, 2002. pp. 37-42.

Duarte, R. T., Campos-Costa, A., (1992). Non-stationary models of ground motion. En X Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, Madrid, España, vol. 2, páginas 891–894.

Esteva, M. L., (1970). Seismic risk and seismic design decisions. *Journal of Seismic Design for Nuclear Power Plants*, paginas 82–142.

EZ-FRISK (2016) “Seismic Program Hazard”, Fugro Consultans Inc., Lakewood Colorado.

Halchuk, S., Adams, J., (2008). Fourth generation seismic hazard maps of canada: Maps and grid values to be used with the 2005 national building code of canada. Informe técnico, Geological Survey of Canada.

Herraiz, S. M., (1997). Conceptos básicos de sismología para ingenieros.

Inca Cabrera E. (2013) "Estudio de peligro sísmico para la ciudad de Ometepec y otras ciudades aledañas del estado de Guerrero".

Juárez, G. H., Gómez, B. A., Rangel, N. n. J. L., Tena, C. A., Roldan, I. J. N. y Pelcastre, P. E., (2012). The March 20, 2012, Ometepec, Mexico, earthquake. En Special Earthquake Report (editado por S. Nath), Learning from Earthquakes. EERI.

Kramer, S. L., (1996). "Geotechnical earthquake engineering". Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics Series, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, c1996, vol. 1.

Ley García J., (2011) "Atlas de riesgo del municipio de Mexicali Baja California".

Lira H. (2005) "Actualización del modelo geológico conceptual del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC." Geotermia .Vol. 18 Núm. 1. Enero-Junio 2005. México. CFE.

Martínez M. J., Carrillo, A. R. (2011) "Revisión de la respuesta y propuesta de reforzamiento conceptual del edificio del poder ejecutivo del estado de Baja California, Utilizando registros del sismo de Mexicali del 4 de Abril de 2010", Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Aguascalientes, Aguascalientes.

McGuire, R. K., (2004). Seismic hazard and risk analysis. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.

Meneses, J., (2010) "The El Mayor Cucapah, Baja California Earthquake April 4, 2010"

Nava, A., (1987). Terremotos. XVIII edición, Nro. 34.

Perez, L, (1968) “Normas y especificaciones para el diseño estructural de las construcciones en el estado de Baja California”

Reiter, L., (1990). “Earthquake hazard analysis: issues and insights”. Columbia University Press. Risk-Engineering, (2011). Ez-Frisk v.7.62, Manual de usuario.. Risk Engineering, Inc., Golden, Colorado, USA.

Rangel J.L., Tena A., Gómez A. (2011). “Comportamiento observado en estructuras y subsuelo del valle y ciudad de Mexicali durante el sismo el Mayor-Cucapah del 4 de abril de 2010”.

RLEEBBC (1976). Reglamento de la Ley de Edificaciones del estado de Baja California. Publicado en el periódico oficial el 10 de junio de 1976.

RLEEBBC (1992). Reglamento de la Ley de Edificaciones del estado de Baja California. Publicado en el periódico oficial el 30 de junio de 1992, Colegio de Ingenieros Civiles de Mexicali, A.C.

RBC-NTC (1992). Reglamento de la ley de edificaciones del estado de Baja California (Normas Tecnicas Complementarias 2012). Colegio de Ingenieros Civiles de Mexicali, A.C.

Sadigh K. (1997) “Attenuation Relationships for Shallow Crustal Earthquakes Based on California Strong Motion Data”.

Sadigh, K., C. -Y. Chang, J. A. Egan, F. Makdisi, and R. R. Youngs (1997), Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data, *Seismological Research Letters*, 68(1), 180-189.

Shepard, D., (1968). "A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data". En *Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference*, páginas 517–524. ACM.

SAP2000 (2011). "Structural Analysis Program", Computers and Structures Inc., Berkeley California.

Suárez-Vidal, F. Et al. (2001) "Distribución de daños materiales en el Valle de Mexicali, B.C." ocasionados por los sismos de 1 de junio y 10 de septiembre, de 1999, $m_w = 4.8$. *GEOS Vol. 21*. pp 22-30

Thenhaus, P. C., Campbell, K. W., (2003). *Seismic hazard analysis*.

Apéndice A

Resultados del Estudio de Peligro Sísmico

Clave	Nombre	Latitud	Longitud	Espectro de Peligro Uniforme Tr=500años											
				0.00	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.75	1.00	2.00	3.00	4.00
MXLI-01	Sta. Isabel I	32.664	-115.533	0.422	0.621	0.877	1.030	0.922	0.807	0.704	0.522	0.417	0.207	0.123	0.084
MXLI-02	Sta. Isabel II	32.647	-115.533	0.409	0.602	0.850	1.004	0.892	0.784	0.681	0.508	0.405	0.202	0.120	0.082
MXLI-03	Sta. Isabel III	32.631	-115.533	0.399	0.587	0.828	0.976	0.869	0.764	0.662	0.496	0.395	0.196	0.117	0.080
MXLI-04	Sta. Isabel IV	32.614	-115.533	0.390	0.576	0.811	0.952	0.850	0.749	0.646	0.485	0.386	0.191	0.115	0.078
MXLI-05	Col. Baja C. I	32.664	-115.514	0.442	0.651	0.919	1.070	0.968	0.844	0.732	0.543	0.433	0.215	0.128	0.088
MXLI-06	CREA	32.647	-115.514	0.426	0.627	0.884	1.038	0.930	0.814	0.709	0.526	0.419	0.208	0.124	0.085
MXLI-07	Virreyes	32.631	-115.514	0.413	0.607	0.856	1.011	0.900	0.789	0.687	0.511	0.407	0.203	0.120	0.082
MXLI-08	Zahorí	32.614	-115.514	0.402	0.592	0.834	0.984	0.875	0.769	0.667	0.499	0.397	0.197	0.118	0.080
MXLI-09	Portales I	32.597	-115.514	0.393	0.580	0.817	0.960	0.856	0.754	0.651	0.488	0.388	0.192	0.115	0.078
MXLI-10	Portales II	32.581	-115.514	0.386	0.571	0.804	0.942	0.841	0.741	0.639	0.479	0.380	0.188	0.113	0.077
MXLI-11	Portales III	32.564	-115.514	0.381	0.565	0.795	0.929	0.831	0.732	0.629	0.471	0.375	0.185	0.111	0.076
MXLI-12	Garita Centro	32.664	-115.492	0.472	0.697	0.983	1.128	1.026	0.898	0.774	0.574	0.458	0.226	0.135	0.093
MXLI-13	Col. Baja C. II	32.647	-115.492	0.450	0.664	0.937	1.086	0.988	0.859	0.744	0.551	0.440	0.217	0.130	0.089
MXLI-14	Bosque CD.	32.631	-115.492	0.433	0.637	0.899	1.052	0.947	0.827	0.719	0.533	0.425	0.210	0.125	0.086
MXLI-15	Santa Mónica	32.614	-115.492	0.419	0.616	0.869	1.023	0.914	0.800	0.698	0.518	0.412	0.205	0.122	0.083
MXLI-16	Villas del Rey I	32.597	-115.492	0.407	0.599	0.845	0.999	0.887	0.779	0.676	0.505	0.402	0.200	0.119	0.081
MXLI-17	Villas del Rey II	32.581	-115.492	0.398	0.586	0.826	0.972	0.866	0.762	0.659	0.493	0.392	0.194	0.116	0.079
MXLI-18	Villas del Rey III	32.564	-115.492	0.390	0.576	0.811	0.952	0.850	0.749	0.646	0.483	0.384	0.190	0.114	0.077
MXLI-19	Primera Secc.	32.664	-115.469	0.510	0.746	1.049	1.204	1.087	0.972	0.831	0.615	0.491	0.240	0.143	0.099
MXLI-20	Centro Cívico	32.647	-115.469	0.483	0.711	1.006	1.150	1.043	0.919	0.790	0.585	0.467	0.229	0.137	0.094
MXLI-21	Col. Zacatecas	32.631	-115.469	0.460	0.679	0.957	1.105	1.007	0.876	0.757	0.561	0.448	0.221	0.131	0.090

Clave	Nombre	Latitud	Longitud	Espectro de Peligro Uniforme Tr=500años											
				0.00	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.75	1.00	2.00	3.00	4.00
MXLI-22	UABC C.S.	32.614	-115.469	0.441	0.649	0.916	1.068	0.966	0.841	0.730	0.541	0.431	0.213	0.127	0.087
MXLI-23	Villas del Rey IV	32.597	-115.469	0.425	0.626	0.883	1.037	0.929	0.813	0.708	0.525	0.418	0.207	0.123	0.084
MXLI-24	Villas del Rey V	32.581	-115.469	0.413	0.607	0.857	1.011	0.900	0.789	0.687	0.511	0.407	0.202	0.120	0.082
MXLI-25	Villas del Rey VI	32.564	-115.469	0.403	0.593	0.836	0.987	0.877	0.771	0.668	0.500	0.397	0.197	0.117	0.080
MXLI-26	Cuauh. N. I	32.667	-115.450	0.553	0.809	1.126	1.303	1.166	1.047	0.905	0.670	0.529	0.258	0.154	0.106
MXLI-27	C.D. Deportiva	32.649	-115.450	0.520	0.760	1.067	1.227	1.105	0.995	0.847	0.627	0.501	0.244	0.146	0.101
MXLI-28	Residencias	32.631	-115.450	0.491	0.721	1.017	1.164	1.055	0.933	0.801	0.593	0.473	0.232	0.138	0.096
MXLI-29	Col. Hidalgo	32.614	-115.450	0.466	0.688	0.971	1.117	1.017	0.888	0.766	0.567	0.453	0.223	0.133	0.091
MXLI-30	Cahova	32.597	-115.450	0.446	0.657	0.927	1.078	0.978	0.851	0.738	0.546	0.436	0.215	0.128	0.088
MXLI-31	Campestre I	32.581	-115.450	0.430	0.633	0.893	1.046	0.940	0.821	0.715	0.529	0.422	0.209	0.124	0.085
MXLI-32	Campestre II	32.564	-115.450	0.417	0.613	0.865	1.019	0.909	0.797	0.694	0.515	0.410	0.203	0.121	0.082
MXLI-33	Cuauh. N. II	32.667	-115.431	0.603	0.884	1.211	1.416	1.257	1.120	0.993	0.727	0.572	0.280	0.167	0.113
MXLI-34	C. Prohogar	32.649	-115.431	0.560	0.819	1.138	1.318	1.178	1.057	0.917	0.679	0.535	0.261	0.156	0.107
MXLI-35	Col. Independencia	32.631	-115.431	0.525	0.769	1.077	1.240	1.116	1.005	0.857	0.634	0.506	0.246	0.147	0.102
MXLI-36	Col. Carvajal	32.614	-115.431	0.499	0.730	1.029	1.179	1.067	0.948	0.812	0.601	0.480	0.234	0.140	0.097
MXLI-37	Kenworth I	32.597	-115.431	0.473	0.699	0.985	1.130	1.027	0.900	0.775	0.574	0.458	0.225	0.134	0.092
MXLI-38	Campestre III	32.581	-115.431	0.452	0.666	0.940	1.089	0.992	0.861	0.746	0.552	0.440	0.217	0.129	0.089
MXLI-39	Campestre IV	32.564	-115.431	0.435	0.640	0.903	1.055	0.951	0.830	0.722	0.534	0.426	0.210	0.125	0.086
MXLI-40	Hípico	32.669	-115.411	0.680	0.999	1.334	1.589	1.393	1.229	1.082	0.804	0.636	0.310	0.186	0.124
MXLI-41	San Pedro Res	32.650	-115.411	0.616	0.904	1.233	1.447	1.281	1.140	1.011	0.741	0.583	0.285	0.170	0.115
MXLI-42	Villa Colonial	32.631	-115.411	0.567	0.831	1.151	1.336	1.192	1.068	0.930	0.689	0.541	0.264	0.158	0.108

Clave	Nombre	Latitud	Longitud	Espectro de Peligro Uniforme Tr=500años											
				0.00	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.75	1.00	2.00	3.00	4.00
MXLI-43	Valle Dorado	32.614	-115.411	0.534	0.781	1.093	1.259	1.131	1.018	0.872	0.645	0.513	0.250	0.149	0.103
MXLI-44	Kenworth II	32.597	-115.411	0.507	0.741	1.043	1.197	1.081	0.965	0.825	0.610	0.487	0.238	0.142	0.098
MXLI-45	Col. Robledo I	32.581	-115.411	0.480	0.708	1.001	1.144	1.039	0.914	0.786	0.582	0.464	0.227	0.135	0.094
MXLI-46	Col. Robledo II	32.564	-115.411	0.458	0.675	0.953	1.101	1.004	0.873	0.755	0.559	0.446	0.219	0.130	0.090
MXLI-47	Garita Nvo Mxli I	32.669	-115.392	0.752	1.087	1.474	1.796	1.554	1.356	1.181	0.894	0.710	0.341	0.207	0.136
MXLI-48	San Pedro Res II	32.650	-115.392	0.688	1.007	1.346	1.606	1.406	1.240	1.091	0.811	0.642	0.312	0.188	0.125
MXLI-49	Villas del Palmar	32.631	-115.392	0.622	0.913	1.243	1.460	1.291	1.148	1.018	0.747	0.588	0.288	0.172	0.116
MXLI-50	Nvo Mxli I	32.614	-115.392	0.578	0.847	1.170	1.361	1.212	1.084	0.950	0.702	0.551	0.269	0.160	0.109
MXLI-51	Nvo Mxli II	32.597	-115.392	0.543	0.794	1.108	1.280	1.148	1.032	0.887	0.657	0.520	0.253	0.151	0.104
MXLI-52	Col. Robledo III	32.581	-115.392	0.514	0.752	1.057	1.214	1.095	0.982	0.838	0.620	0.495	0.241	0.144	0.100
MXLI-53	Col. Robledo IV	32.564	-115.392	0.488	0.717	1.013	1.159	1.050	0.928	0.797	0.590	0.471	0.230	0.137	0.095
MXLI-54	Garita Nvo Mxli II	32.669	-115.372	0.834	1.191	1.654	2.044	1.763	1.516	1.302	1.007	0.784	0.378	0.227	0.150
MXLI-55	Segovia	32.650	-115.372	0.760	1.097	1.491	1.820	1.573	1.370	1.192	0.905	0.717	0.344	0.209	0.137
MXLI-56	H. Mat. Inf.	32.631	-115.372	0.696	1.016	1.359	1.625	1.421	1.252	1.100	0.820	0.649	0.315	0.190	0.126
MXLI-57	Sevilla Residencial	32.614	-115.372	0.637	0.935	1.267	1.494	1.318	1.170	1.035	0.761	0.600	0.294	0.175	0.118
MXLI-58	Bugambilias	32.597	-115.372	0.590	0.865	1.190	1.388	1.234	1.102	0.971	0.714	0.561	0.274	0.163	0.111
MXLI-59	Valle del Puebla I	32.581	-115.372	0.553	0.809	1.126	1.303	1.166	1.047	0.905	0.670	0.529	0.258	0.154	0.106
MXLI-60	Valle del Puebla II	32.564	-115.372	0.522	0.764	1.072	1.233	1.110	1.001	0.852	0.630	0.503	0.244	0.146	0.101
MXLI-61	Papelera S.F.	32.650	-115.353	0.843	1.202	1.673	2.062	1.786	1.533	1.315	1.015	0.791	0.382	0.229	0.151
MXLI-62	Lienzo Charro	32.631	-115.353	0.767	1.106	1.507	1.844	1.591	1.385	1.203	0.915	0.723	0.347	0.210	0.138
MXLI-63	Rancho Arroyo H	32.614	-115.353	0.712	1.035	1.389	1.669	1.455	1.279	1.121	0.839	0.666	0.322	0.195	0.128

Clave	Nombre	Latitud	Longitud	Espectro de Peligro Uniforme Tr=500años											
				0.00	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.75	1.00	2.00	3.00	4.00
MXLI-64	Victoria Res.	32.597	-115.353	0.653	0.959	1.292	1.528	1.345	1.192	1.053	0.777	0.613	0.300	0.179	0.120
MXLI-65	Valle del Puebla III	32.581	-115.353	0.603	0.884	1.211	1.417	1.257	1.121	0.994	0.727	0.572	0.279	0.167	0.113
MXLI-66	Valle del Puebla IV	32.564	-115.353	0.563	0.824	1.143	1.326	1.185	1.062	0.923	0.683	0.538	0.262	0.156	0.107
MXLI-67	Col. Abasolo I	32.650	-115.333	0.935	1.319	1.891	2.245	2.019	1.715	1.447	1.095	0.870	0.419	0.250	0.166
MXLI-68	Col. Abasolo II	32.631	-115.333	0.852	1.213	1.695	2.081	1.810	1.551	1.328	1.023	0.800	0.386	0.231	0.153
MXLI-69	Islas Agrarias	32.614	-115.333	0.785	1.129	1.545	1.904	1.637	1.420	1.230	0.941	0.740	0.356	0.215	0.141
MXLI-70	Condesa Res.	32.597	-115.333	0.727	1.055	1.421	1.716	1.492	1.308	1.144	0.860	0.683	0.329	0.200	0.131
MXLI-71	Valle del Puebla V	32.581	-115.333	0.670	0.985	1.319	1.567	1.376	1.216	1.072	0.794	0.628	0.306	0.183	0.122
MXLI-72	Valle del Puebla VI	32.564	-115.333	0.617	0.904	1.234	1.448	1.281	1.140	1.012	0.741	0.583	0.285	0.170	0.115
MXLI-73	Carr. Aero I	32.650	-115.292	0.793	1.139	1.562	1.929	1.656	1.434	1.241	0.951	0.746	0.359	0.216	0.142
MXLI-74	Carr. Aero II	32.631	-115.292	0.872	1.238	1.741	2.122	1.863	1.591	1.357	1.041	0.817	0.395	0.236	0.156
MXLI-75	Carr. Aero III	32.614	-115.292	0.943	1.330	1.911	2.260	2.032	1.731	1.458	1.102	0.877	0.421	0.251	0.167
MXLI-76	Carr. Aero IV	32.597	-115.292	0.907	1.283	1.823	2.192	1.957	1.660	1.407	1.071	0.847	0.408	0.244	0.161
MXLI-77	Aeropuerto I	32.631	-115.244	0.678	0.997	1.331	1.584	1.389	1.226	1.080	0.801	0.633	0.308	0.184	0.123
MXLI-78	Aeropuerto II	32.614	-115.244	0.735	1.064	1.437	1.739	1.510	1.321	1.154	0.869	0.691	0.331	0.201	0.132
VMXli-01	Centinela	32.644	-115.669	0.368	0.550	0.773	0.895	0.800	0.704	0.602	0.451	0.358	0.177	0.108	0.073
VMXli-02	José Ma. Rod.	32.644	-115.146	0.433	0.637	0.897	1.049	0.941	0.819	0.711	0.523	0.414	0.203	0.120	0.082
VMXli-03	Ej. Lázaro Card.	32.644	-115.042	0.341	0.511	0.716	0.824	0.741	0.644	0.551	0.410	0.323	0.155	0.095	0.064
VMXli-04	Ej. Mérida	32.644	-114.938	0.272	0.407	0.567	0.660	0.593	0.519	0.446	0.331	0.261	0.127	0.078	0.053
VMXli-05	Cd. Morelos	32.644	-114.833	0.216	0.318	0.445	0.524	0.478	0.420	0.362	0.272	0.217	0.108	0.066	0.044
VMXli-06	Valle Yuma	32.644	-114.729	0.180	0.265	0.372	0.440	0.404	0.355	0.309	0.232	0.185	0.094	0.057	0.038

Clave	Nombre	Latitud	Longitud	Espectro de Peligro Uniforme Tr=500años											
				0.00	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.75	1.00	2.00	3.00	4.00
VMXli-07	Algodones	32.733	-114.729	0.166	0.245	0.341	0.405	0.372	0.329	0.286	0.217	0.172	0.088	0.054	0.035
VMXli-08	Lag. Sal. 01	32.555	-115.669	0.422	0.628	0.875	1.012	0.891	0.770	0.658	0.484	0.381	0.185	0.112	0.076
VMXli-09	Ej. Progreso	32.555	-115.564	0.376	0.560	0.786	0.912	0.814	0.715	0.611	0.456	0.362	0.178	0.108	0.073
VMXli-10	Ej. Choropo	32.555	-115.460	0.405	0.595	0.839	0.991	0.880	0.774	0.671	0.501	0.399	0.197	0.117	0.080
VMXli-11	Ej. Puebla	32.555	-115.355	0.540	0.790	1.103	1.273	1.142	1.027	0.882	0.653	0.518	0.252	0.150	0.104
VMXli-12	Ej. Sinaloa	32.555	-115.251	0.921	1.301	1.857	2.219	1.995	1.688	1.427	1.083	0.859	0.414	0.247	0.164
VMXli-13	Ej. Querétaro	32.555	-115.146	0.578	0.847	1.169	1.359	1.211	1.083	0.947	0.700	0.547	0.265	0.158	0.108
VMXli-14	Ej. Benito Jua.	32.555	-115.042	0.406	0.596	0.839	0.992	0.876	0.767	0.661	0.490	0.386	0.187	0.112	0.076
VMXli-15	Ej. Tabasco	32.555	-114.938	0.318	0.475	0.665	0.768	0.693	0.598	0.516	0.381	0.302	0.144	0.088	0.059
VMXli-16	Rio Colorado 01	32.555	-114.833	0.244	0.364	0.510	0.593	0.537	0.471	0.406	0.303	0.238	0.117	0.072	0.048
VMXli-17	Somerton	32.555	-114.729	0.198	0.291	0.408	0.480	0.437	0.384	0.332	0.248	0.200	0.100	0.061	0.040
VMXli-18	Lag. Sal. 02	32.466	-115.669	0.473	0.702	0.972	1.098	0.983	0.842	0.717	0.520	0.408	0.195	0.116	0.078
VMXli-19	Sierra Cucapah 01	32.466	-115.564	0.437	0.650	0.905	1.040	0.922	0.796	0.682	0.500	0.394	0.191	0.114	0.077
VMXli-20	Relleno S. Mxli	32.466	-115.460	0.388	0.575	0.808	0.943	0.839	0.737	0.632	0.471	0.373	0.183	0.110	0.075
VMXli-21	Ej. Cerro Prieto	32.466	-115.355	0.426	0.626	0.884	1.038	0.931	0.814	0.709	0.525	0.418	0.206	0.122	0.084
VMXli-22	Ej. Mich. Ocampo	32.466	-115.251	0.600	0.879	1.206	1.410	1.251	1.116	0.989	0.725	0.569	0.278	0.166	0.112
VMXli-23	Ej. Jalapa	32.466	-115.146	0.848	1.208	1.684	2.072	1.799	1.543	1.322	1.019	0.796	0.384	0.230	0.152
VMXli-24	Ej. Quintana Roo	32.466	-115.042	0.462	0.682	0.961	1.108	1.008	0.875	0.754	0.555	0.441	0.214	0.127	0.087
VMXli-25	Rio Colorado 02	32.466	-114.938	0.341	0.513	0.718	0.825	0.742	0.644	0.551	0.409	0.322	0.154	0.094	0.063
VMXli-26	SLRC Oeste	32.466	-114.833	0.272	0.411	0.571	0.659	0.590	0.514	0.439	0.325	0.255	0.123	0.075	0.051

Clave	Nombre	Latitud	Longitud	Espectro de Peligro Uniforme Tr=500años											
				0.00	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.75	1.00	2.00	3.00	4.00
VMXli-27	SLRC Este	32.466	-114.729	0.214	0.319	0.446	0.520	0.471	0.412	0.353	0.263	0.210	0.104	0.063	0.041
VMXli-28	Lag. Sal. 03	32.360	-115.669	0.353	0.535	0.745	0.848	0.752	0.645	0.545	0.398	0.311	0.147	0.089	0.060
VMXli-29	Lag. Sal. 04	32.360	-115.564	0.430	0.640	0.889	1.023	0.900	0.774	0.658	0.479	0.375	0.179	0.108	0.073
VMXli-30	Sierra Cucapah 02	32.360	-115.460	0.480	0.710	0.988	1.118	1.004	0.866	0.739	0.541	0.426	0.205	0.122	0.083
VMXli-31	Ej. Reacomodo	32.360	-115.355	0.408	0.602	0.846	0.992	0.879	0.768	0.662	0.492	0.390	0.190	0.114	0.077
VMXli-32	Lagunas Cerro Prieto	32.360	-115.251	0.427	0.628	0.886	1.040	0.934	0.816	0.711	0.526	0.419	0.206	0.122	0.084
VMXli-33	Est. Delta	32.360	-115.146	0.452	0.666	0.939	1.088	0.990	0.859	0.744	0.549	0.437	0.214	0.127	0.087
VMXli-34	Col. Elias	32.360	-115.042	0.388	0.573	0.806	0.943	0.840	0.738	0.633	0.471	0.372	0.180	0.109	0.074
VMXli-35	Ej. El Barrote	32.360	-114.938	0.329	0.500	0.698	0.796	0.716	0.617	0.529	0.392	0.309	0.146	0.089	0.060
VMXli-36	La Datilera	32.360	-114.833	0.291	0.445	0.616	0.702	0.621	0.534	0.454	0.333	0.261	0.124	0.075	0.050
VMXli-37	Desierto de SLRC	32.360	-114.729	0.238	0.363	0.506	0.575	0.516	0.444	0.378	0.278	0.219	0.106	0.064	0.042
VMXli-38	Lag. Sal. 05	32.271	-115.669	0.318	0.488	0.677	0.764	0.680	0.578	0.490	0.356	0.277	0.130	0.079	0.052
VMXli-39	Lag. Sal. 06	32.271	-115.564	0.348	0.528	0.736	0.836	0.742	0.637	0.539	0.395	0.309	0.146	0.088	0.059
VMXli-40	Sierra Cucapah 03	32.271	-115.460	0.418	0.621	0.864	1.001	0.876	0.756	0.642	0.469	0.368	0.176	0.106	0.071
VMXli-41	El Faro	32.271	-115.355	0.433	0.643	0.897	1.034	0.917	0.793	0.679	0.499	0.393	0.190	0.113	0.077
VMXli-42	Ej. Durango	32.271	-115.251	0.365	0.546	0.766	0.887	0.794	0.699	0.595	0.444	0.352	0.170	0.104	0.070
VMXli-43	Ej. Gpe. Victoria	32.271	-115.146	0.350	0.527	0.739	0.851	0.766	0.671	0.574	0.429	0.339	0.164	0.101	0.067
VMXli-44	Rio Colorado 03	32.271	-115.042	0.332	0.504	0.705	0.804	0.724	0.627	0.537	0.401	0.316	0.151	0.092	0.061
VMXli-45	Ej. Independencia	32.271	-114.938	0.312	0.478	0.664	0.753	0.673	0.577	0.494	0.362	0.285	0.135	0.082	0.054
VMXli-46	Rancho Pinocho	32.182	-115.669	0.303	0.467	0.645	0.726	0.641	0.545	0.458	0.332	0.257	0.120	0.072	0.047

Clave	Nombre	Latitud	Longitud	Espectro de Peligro Uniforme Tr=500años											
				0.00	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.75	1.00	2.00	3.00	4.00
VMXli-47	Pozo Cenizo	32.182	-115.564	0.316	0.486	0.674	0.761	0.677	0.577	0.489	0.355	0.277	0.130	0.078	0.052
VMXli-48	Lag. Sal. 07	32.182	-115.460	0.340	0.518	0.722	0.818	0.729	0.624	0.530	0.388	0.304	0.143	0.087	0.058
VMXli-49	Cerro El Mayor	32.182	-115.355	0.346	0.525	0.732	0.833	0.743	0.640	0.544	0.401	0.315	0.149	0.091	0.061
VMXli-50	Campo Mosqueda	32.182	-115.251	0.328	0.500	0.698	0.792	0.712	0.613	0.524	0.388	0.307	0.146	0.089	0.059
VMXli-51	Ej. Sombrerete	32.182	-115.146	0.317	0.484	0.674	0.766	0.687	0.591	0.507	0.375	0.297	0.141	0.086	0.057
VMXli-52	Est. Coah	32.182	-115.042	0.309	0.475	0.659	0.746	0.666	0.571	0.488	0.359	0.282	0.134	0.081	0.054
VMXli-53	Riito	32.182	-114.938	0.302	0.466	0.645	0.727	0.645	0.551	0.466	0.341	0.266	0.126	0.076	0.050
VMXli-54	Lag. Sal. 08	32.093	-115.669	0.294	0.455	0.628	0.705	0.618	0.523	0.437	0.315	0.243	0.113	0.067	0.043
VMXli-55	Lag. Sal. 09	32.093	-115.564	0.303	0.467	0.645	0.727	0.642	0.546	0.459	0.333	0.258	0.120	0.072	0.047
VMXli-56	Lag. Sal. 10	32.093	-115.460	0.310	0.476	0.660	0.745	0.661	0.564	0.477	0.347	0.271	0.127	0.076	0.051
VMXli-57	Sierra Cucapah 04	32.093	-115.355	0.311	0.478	0.663	0.750	0.667	0.570	0.484	0.354	0.277	0.130	0.079	0.052
VMXli-58	Rio Hardy 01	32.093	-115.251	0.308	0.473	0.656	0.741	0.659	0.564	0.479	0.351	0.275	0.130	0.079	0.052
VMXli-59	Ej. Alberto Oviedo	32.093	-115.146	0.304	0.468	0.648	0.731	0.649	0.555	0.471	0.345	0.270	0.128	0.077	0.051
VMXli-60	Campo Sonora	32.093	-115.042	0.301	0.465	0.642	0.723	0.639	0.546	0.461	0.337	0.263	0.124	0.074	0.049
VMXli-61	Encinas Johnson	32.093	-114.938	0.298	0.462	0.637	0.715	0.631	0.536	0.451	0.328	0.255	0.119	0.071	0.046
VMXli-62	Lag. Sal. 11	32.003	-115.669	0.284	0.443	0.609	0.680	0.594	0.502	0.417	0.299	0.229	0.106	0.062	0.040
VMXli-63	Lag. Sal. 12	32.003	-115.564	0.295	0.458	0.632	0.709	0.622	0.526	0.440	0.317	0.244	0.113	0.067	0.043
VMXli-64	Lag. Sal. 13	32.003	-115.460	0.299	0.463	0.639	0.718	0.633	0.538	0.451	0.327	0.253	0.118	0.070	0.046
VMXli-65	Lag. Sal. 14	32.003	-115.355	0.300	0.464	0.641	0.721	0.637	0.542	0.456	0.331	0.257	0.120	0.072	0.047
VMXli-66	Lag. Sal. 15	32.003	-115.251	0.299	0.463	0.640	0.719	0.635	0.541	0.455	0.331	0.258	0.121	0.072	0.047

Clave	Nombre	Latitud	Longitud	Espectro de Peligro Uniforme Tr=500años											
				0.00	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.75	1.00	2.00	3.00	4.00
VMXli-67	Lag. Sal. 16	32.003	-115.146	0.298	0.462	0.638	0.716	0.632	0.537	0.452	0.329	0.256	0.120	0.072	0.047
VMXli-68	Delta R. Colorado 01	32.003	-115.042	0.297	0.461	0.636	0.713	0.628	0.534	0.448	0.325	0.252	0.118	0.070	0.045
VMXli-69	Ej. Indiviso	32.003	-114.938	0.296	0.460	0.634	0.710	0.625	0.529	0.443	0.320	0.247	0.115	0.068	0.044
VMXli-70	Lag. Sal. 17	31.914	-115.460	0.295	0.458	0.631	0.708	0.620	0.525	0.437	0.314	0.242	0.111	0.065	0.042
VMXli-71	Lag. Sal. 18	31.914	-115.355	0.296	0.460	0.634	0.711	0.625	0.529	0.442	0.319	0.246	0.114	0.067	0.043
VMXli-72	Lag. Sal. 19	31.914	-115.251	0.296	0.460	0.634	0.711	0.626	0.530	0.444	0.321	0.248	0.115	0.068	0.044
VMXli-73	Lag. Sal. 20	31.914	-115.146	0.295	0.460	0.634	0.710	0.625	0.529	0.443	0.320	0.247	0.115	0.068	0.044
VMXli-74	Delta R. Colorado 02	31.914	-115.042	0.295	0.459	0.633	0.709	0.624	0.528	0.441	0.318	0.246	0.113	0.067	0.043
VMXli-75	Delta R. Colorado 03	31.914	-114.938	0.295	0.459	0.632	0.708	0.622	0.526	0.439	0.316	0.243	0.112	0.066	0.042
VMXli-76	Lag. Sal. 21	31.825	-115.460	0.292	0.455	0.626	0.701	0.612	0.516	0.428	0.305	0.233	0.106	0.062	0.040
VMXli-77	Lag. Sal. 22	31.825	-115.355	0.294	0.458	0.631	0.706	0.619	0.523	0.435	0.312	0.239	0.109	0.064	0.041
VMXli-78	Lag. Sal. 23	31.825	-115.251	0.294	0.459	0.632	0.708	0.621	0.525	0.438	0.315	0.242	0.111	0.065	0.042
VMXli-79	Cerro Pinto 01	31.825	-115.146	0.294	0.459	0.632	0.708	0.622	0.526	0.439	0.315	0.243	0.111	0.065	0.042
VMXli-80	Cerro Pinto 02	31.825	-115.042	0.294	0.459	0.632	0.708	0.621	0.526	0.438	0.315	0.242	0.111	0.065	0.042
VMXli-81	Delta R. Colorado 04	31.825	-114.938	0.294	0.459	0.632	0.707	0.621	0.525	0.437	0.314	0.241	0.110	0.064	0.041
VMXli-82	Lag. Sal. 24	31.736	-115.460	0.288	0.450	0.619	0.691	0.603	0.507	0.419	0.297	0.226	0.102	0.059	0.038
VMXli-83	Lag. Sal. 25	31.736	-115.355	0.293	0.457	0.629	0.704	0.615	0.519	0.430	0.307	0.234	0.106	0.061	0.039
VMXli-84	Lag. Sal. 26	31.736	-115.251	0.294	0.458	0.631	0.706	0.619	0.523	0.434	0.311	0.238	0.108	0.062	0.040
VMXli-85	Cerro Pinto 03	31.736	-115.146	0.294	0.459	0.631	0.707	0.620	0.524	0.436	0.313	0.240	0.109	0.063	0.040
VMXli-86	Cerro Pinto 04	31.736	-115.042	0.294	0.459	0.632	0.707	0.620	0.524	0.437	0.313	0.240	0.109	0.063	0.040

Clave	Nombre	Latitud	Longitud	Espectro de Peligro Uniforme Tr=500años											
				0.00	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.75	1.00	2.00	3.00	4.00
VMXli-87	Delta R. Colorado 05	31.736	-114.938	0.294	0.459	0.631	0.707	0.620	0.524	0.436	0.313	0.240	0.108	0.063	0.040
VMXli-88	Lag. Sal. 27	31.647	-115.460	0.281	0.440	0.604	0.673	0.586	0.492	0.405	0.286	0.218	0.097	0.056	0.036
VMXli-89	Lag. Sal. 28	31.647	-115.355	0.291	0.455	0.625	0.699	0.610	0.513	0.425	0.302	0.229	0.102	0.059	0.038
VMXli-90	Lag. Sal. 29	31.647	-115.251	0.293	0.458	0.630	0.705	0.617	0.520	0.432	0.308	0.235	0.105	0.061	0.039
VMXli-91	Cerro Pinto 05	31.647	-115.146	0.294	0.458	0.631	0.706	0.619	0.523	0.435	0.311	0.238	0.107	0.062	0.039
VMXli-92	Cerro Pinto 06	31.647	-115.042	0.294	0.459	0.631	0.707	0.620	0.524	0.436	0.312	0.239	0.107	0.062	0.040
VMXli-93	Delta R. Colorado 06	31.647	-114.938	0.294	0.459	0.631	0.707	0.620	0.524	0.435	0.312	0.238	0.107	0.061	0.039
VMXli-94	Cerro Arrajal 01	31.558	-115.355	0.288	0.450	0.618	0.690	0.601	0.505	0.416	0.294	0.223	0.098	0.055	0.035
VMXli-95	Cerro Arrajal 02	31.558	-115.251	0.292	0.457	0.628	0.703	0.614	0.517	0.428	0.304	0.231	0.102	0.058	0.037
VMXli-96	Cerro Arrajal 03	31.558	-115.146	0.293	0.458	0.630	0.706	0.618	0.521	0.433	0.308	0.235	0.105	0.060	0.038
VMXli-97	Carretera Federal 5	31.558	-115.042	0.294	0.458	0.631	0.707	0.619	0.523	0.435	0.310	0.237	0.106	0.060	0.038
VMXli-98	Delta R. Colorado 07	31.558	-114.938	0.294	0.459	0.631	0.707	0.620	0.523	0.435	0.311	0.238	0.106	0.061	0.038
VMXli-99	Cerro Arrajal 04	31.468	-115.355	0.281	0.440	0.604	0.673	0.586	0.491	0.404	0.284	0.215	0.094	0.053	0.033
VMXli-100	Cerro Arrajal 05	31.468	-115.251	0.291	0.454	0.625	0.699	0.609	0.512	0.423	0.300	0.227	0.100	0.056	0.035
VMXli-101	Cerro Arrajal 06	31.468	-115.146	0.293	0.457	0.630	0.705	0.616	0.520	0.430	0.306	0.233	0.103	0.058	0.037
VMXli-102	Entronque Carr. 5 - 3	31.468	-115.042	0.294	0.458	0.631	0.706	0.619	0.522	0.434	0.309	0.236	0.105	0.060	0.038
VMXli-103	Delta Rio Colorado 08	31.468	-114.938	0.294	0.458	0.631	0.707	0.620	0.523	0.435	0.311	0.237	0.106	0.060	0.038
VMXli-104	San Felipe 01	31.379	-115.355	0.267	0.419	0.575	0.637	0.557	0.465	0.382	0.268	0.204	0.089	0.050	0.032
VMXli-105	San Felipe 02	31.379	-115.251	0.288	0.450	0.618	0.690	0.601	0.505	0.416	0.293	0.222	0.097	0.055	0.034
VMXli-106	San Felipe 03	31.379	-115.146	0.292	0.457	0.628	0.703	0.614	0.517	0.428	0.304	0.230	0.101	0.057	0.036

Clave	Nombre	Latitud	Longitud	Espectro de Peligro Uniforme Tr=500años											
				0.00	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.75	1.00	2.00	3.00	4.00
VMXli-107	San Felipe 04	31.379	-115.042	0.293	0.458	0.630	0.706	0.618	0.521	0.432	0.308	0.234	0.104	0.059	0.037
VMXli-108	San Felipe 05	31.379	-114.938	0.294	0.458	0.631	0.707	0.619	0.523	0.434	0.310	0.236	0.105	0.060	0.038
VMXli-109	San Felipe 06	31.290	-115.355	0.242	0.379	0.522	0.579	0.510	0.425	0.349	0.246	0.187	0.082	0.047	0.030
VMXli-110	San Felipe 07	31.290	-115.251	0.281	0.440	0.603	0.671	0.585	0.490	0.403	0.283	0.214	0.093	0.052	0.033
VMXli-111	San Felipe 08	31.290	-115.146	0.291	0.454	0.625	0.699	0.609	0.512	0.423	0.299	0.226	0.099	0.056	0.035
VMXli-112	San Felipe 09	31.290	-115.042	0.293	0.457	0.630	0.705	0.616	0.519	0.430	0.306	0.232	0.102	0.058	0.036
VMXli-113	San Felipe 10	31.290	-114.938	0.294	0.458	0.631	0.706	0.619	0.522	0.433	0.309	0.235	0.104	0.059	0.037
VMXli-114	San Felipe 11	31.201	-115.355	0.210	0.325	0.450	0.507	0.445	0.374	0.310	0.220	0.167	0.075	0.043	0.027
VMXli-115	San Felipe 12	31.201	-115.251	0.266	0.418	0.573	0.635	0.555	0.463	0.381	0.267	0.203	0.088	0.050	0.031
VMXli-116	San Felipe 13	31.201	-115.146	0.287	0.450	0.618	0.689	0.600	0.504	0.415	0.292	0.221	0.096	0.054	0.034
VMXli-117	San Felipe 14	31.201	-115.042	0.292	0.456	0.628	0.703	0.614	0.517	0.427	0.303	0.230	0.101	0.057	0.036
VMXli-118	San Felipe 15	31.201	-114.938	0.293	0.458	0.630	0.706	0.618	0.521	0.432	0.308	0.234	0.103	0.059	0.037
VMXli-119	San Felipe 16	31.112	-115.251	0.241	0.377	0.520	0.576	0.507	0.423	0.348	0.245	0.186	0.082	0.046	0.029
VMXli-120	San Felipe 17	31.112	-115.146	0.280	0.439	0.603	0.670	0.584	0.489	0.402	0.282	0.214	0.092	0.052	0.032
VMXli-121	San Felipe 18	31.112	-115.042	0.291	0.454	0.625	0.699	0.609	0.512	0.423	0.299	0.226	0.099	0.056	0.035
VMXli-122	San Felipe 19	31.112	-114.938	0.293	0.457	0.629	0.705	0.616	0.519	0.430	0.306	0.232	0.102	0.058	0.036
VMXli-123	San Felipe 20	31.112	-114.833	0.294	0.458	0.631	0.706	0.619	0.522	0.433	0.309	0.235	0.104	0.059	0.037
VMXli-124	San Felipe 21	31.000	-115.042	0.286	0.447	0.614	0.685	0.596	0.501	0.412	0.290	0.219	0.095	0.053	0.033
VMXli-125	San Felipe 22	31.000	-114.938	0.292	0.456	0.627	0.702	0.613	0.515	0.426	0.302	0.229	0.100	0.056	0.035
VMXli-126	San Felipe 23	31.000	-114.833	0.293	0.458	0.630	0.706	0.617	0.521	0.432	0.307	0.234	0.103	0.058	0.036